

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Domagoj Putak Ivić

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauperl

Student:

Domagoj Putak Ivić

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Zdravku Schauperl na velikom strpljenju susretljivost i podršci prilikom izrade ovoga rada. Svojim stručnim savjetima, pomoći i komentarima uvelike je unaprijedio njegovu kvalitetu.

Zahvalio bih se prof. dr. sc. Željku Alar za omogućavanje ispitivanja mehaničkih svojstava kao i tehničkom suradniku Romanu Divjak za pomoć prilikom ispitivanja mehaničkih svojstava.

Zahvalio bih se asistentu Ivanu Taritaš, mag.ing. koji je omogućio nabavku ispitnog uzorka jarbola bez kojeg ovaj rad ne bi bio moguć.

Zahvaljujem se dr. sc. Martinu Balog sa IMMM u Bratislavi na suradnji, te izradi uzorka kompozita s metalnom matricom bez kojeg ovaj rad ne bi bio moguć.

Zahvalio bih se tehničkom suradniku Ivanu Vovk koji je uvelike pomogao prilikom izrade uzoraka i pripreme za analizu.

Zahvalio bih se Ani Bezmalinović, ing za pomoć i trud uložen oko izvođenja analize.

Zahvalio bih se tehničkom suradniku Božidaru Bušetinčan za susretljivost i savjesnost tijekom izrade i izrezivanja uzoraka, te za otvoreno pružanje iskustvenih savjeta.

Zahvalio bih se svojoj obitelji na financijskoj pomoći tijekom studija.

Naposljetku, posebno bih se zahvalio svojoj djevojci Ivani na nesebičnoj brizi, pomoći, podršci i iznimnom strpljenju tijekom cijelog trajanja mog studija.

Domagoj Putak Ivić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

| | |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | Prilog |
| Klasa: | |
| Ur.broj: | |

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Domagoj Putak Ivić** Mat. br.: 0035164478

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena Al kompozita za jarbole**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of Al composites for masts**

Opis zadatka:

Jedan od najopterećenijih dijelova jedrilica je svakako jarbol. Osim dobrih mehaničkih svojstava materijal od kojeg se izrađuju jarboli mora imati i malu gustoću pa se za njihovu izradu najčešće koriste toplinski očvrstljive legure aluminija.

U ovom radu je potrebno napraviti analizu postojećih materijala za izradu jarbola te odrediti karakteristike materijala koji se najčešće koristi. Na temelju općih i specifičnih zahtjeva koji se postavljaju na materijal za izradu jarbola potrebno je predložiti alternativni materijal iz grupe metalnih kompozita. Potrebno je provesti laboratorijska ispitivanja odabranog alternativnog materijala te usporediti rezultate sa svojstvima postojećih, do sada korištenih materijala.

Na temelju dobivenih rezultata ispitivanja potrebno je donijeti zaključke o mogućnosti primjene naprednih kompozita u izradi jarbola za jedrilice.

Zadatak zadan:

7. svibnja 2015.

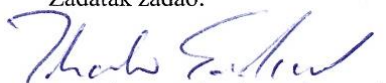
Rok predaje rada:

9. srpnja 2015.

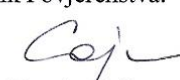
Predviđeni datum obrane:

15., 16. i 17. srpnja 2015.

Zadatak zadao:


Prof.dr.sc. Zdravko Schaperl

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

| | |
|---|------|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | III |
| POPIS TABLICA..... | V |
| POPIS OZNAKA | VI |
| SAŽETAK..... | VII |
| SUMMARY | VIII |
| 1. UVOD | 1 |
| 2. KOMPOZITNE TVOREVINE..... | 2 |
| 2.1. Materijali za izradu komponenata kompozita | 4 |
| 2.1.1. Matrice – materijali i zadaća | 5 |
| 2.1.2. Ojačanja – materijali i zadaće..... | 6 |
| 2.1.2.1. Materijali i zadaće vlakana | 7 |
| 2.1.2.2. Materijali i zadaća ojačala u obliku čestica – punila | 7 |
| 2.2. Kompoziti s metalnom matricom | 9 |
| 2.2.1. Postupci proizvodnje i obrade kompozita s metalnom matricom..... | 11 |
| 2.2.1.1. Lijevanje miješanjem..... | 13 |
| 2.2.1.2. Infiltracija stlačenim plinom..... | 14 |
| 2.2.1.3. Lijevanje tiskanjem (Squeeze Casting) | 16 |
| 2.2.2. Mehanizmi očvršćivanja metalnih kompozita | 17 |
| 2.2.2.1. Ojačavanje metalnih kompozita česticama..... | 18 |
| 3. SPORTSKE JEDRILICE..... | 22 |
| 3.1. Razvoj jedra i jarbola | 23 |
| 3.1.1. Materijali za izradu jarbola..... | 24 |
| 4. EKSPERIMENTALNI DIO | 31 |

| | | |
|----------|--|----|
| 4.1. | Metode ispitivanja i analize..... | 31 |
| 4.1.1. | Ispitivanje mehaničkih svojstava statičkim vlačnim pokusom..... | 31 |
| 4.1.2. | Metalografska analiza..... | 35 |
| 4.1.2.1. | Postupak pripreme uzoraka za metalografsku analizu..... | 36 |
| 4.1.3. | Ispitivanje tvrdoće po Brinell-u i Vickers-u | 39 |
| 4.1.4. | Optička emisijska spektrometrija s tinjajućim izbojem GD-OES | 42 |
| 4.2. | Rezultati provedenih ispitivanja i analiza..... | 44 |
| 4.2.1. | Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava..... | 44 |
| 4.2.1.1. | Ispitivanje uzoraka aluminijske legure | 44 |
| 4.2.1.2. | Ispitivanja aluminijske legure s dodatkom SiC čestica | 49 |
| 4.2.1.3. | Usporedba rezultata mehaničkih ispitivanja..... | 51 |
| 4.2.2. | Rezultati metalografske analize..... | 52 |
| 4.2.2.1. | Analiza uzorka aluminijske legure | 53 |
| 4.2.2.2. | Analiza uzorka Al-SiC kompozita..... | 55 |
| 4.2.3. | Rezultati ispitivanja tvrdoće | 58 |
| 4.2.4. | Rezultati kvantitativne analize - Optičkom emisijskom spektrometrijom s tinjajućim izbojem (GD-OES)..... | 59 |
| 4.3. | Simulacija savijanja jarbola i usporedba ponašanja ispitanih materijala FEM analizom | 59 |
| 5. | ZAKLJUČAK | 65 |
| 6. | LITERATURA | 66 |

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 1. Prikaz općenite podjele kompozitnih tvorevina [2] | 3 |
| Slika 2. Prikaz područja iz kojih se najčešće kombiniraju kompoziti s navedenim nekim svojstvima [4] | 5 |
| Slika 3. Prikaz klasifikacije kompozita s metalnom matricom [1] | 11 |
| Slika 4. Prikaz različitih oblika ojačavanja kompozita s metalnom matricom; (A) Kontinuirana vlakna, (B) Diskontinuirana vlakna (viskeri), (C) Čestice [1] | 11 |
| Slika 5. Shematski prikaz postupka lijevanja miješanjem | 14 |
| Slika 6. Shematski prikaz postupka infiltracije stlačenim plinom | 16 |
| Slika 7. Prikaz (A) neposrednog i (B) posrednog oblikovanja lijevanjem [6] | 17 |
| Slika 8. Prikaz modela Rimske galije [25] | 24 |
| Slika 9. Različiti presjeci drvenih jarbola | 26 |
| Slika 10. Različiti presjeci aluminijskih jarbola [27] | 28 |
| Slika 11. Katamaran sa krutim jedrom i jarbolom od ugljičnih vlakana [29] | 29 |
| Slika 12. Prikaz uobičajene epruvete za statički vlačni pokus prema normi DIN 50 115; L_0 - početna mjerna duljina, d_0 – početni promjer, S_0 – ploština početnog presjeka [30] | 32 |
| Slika 13. Dijagram promjene sile F na kidalici i produljenja epruvete ΔL (meki čelik) | 32 |
| Slika 14. Dijagram promjene naprezanja ispitne epruvete u ovisnosti o produljenju [30] | 33 |
| Slika 15. Dijagram naprezanje σ - istezanje ε za materijale s neizraženim prijelazom iz elastičnog u plastično područje – određivanje konvencionalne granice razvlačenja $R_{p0,2}$ [30] | 35 |
| Slika 16. Prikaz na slici (A) prikazuje utjecaj povišenja temperature na σ - ε dijagram ($T_3 > T_2 > T_1 > T_0$), a (B) utjecaj sniženja temperature na σ - ε dijagram ($T_2 < T_1 < T_0$) | 35 |
| Slika 17. Uređaj na kojem je proveden postupak brušenja ispitnih uzoraka u Laboratoriju za materijalografiju | 37 |
| Slika 18. Uređaj na kojem se provodio postupak poliranja ispitnih uzoraka u Laboratoriju za metalografiju | 38 |
| Slika 19. Nagrizanje se obavezno provodi ispod "haube" zbog mogućih štetnih isparavanja | 38 |
| Slika 20. Skica kuglice i otiska kod Brinell-ove metode [31] | 40 |
| Slika 21. Shematski prikaz indentora i otiska kod ispitivanja tvrdoće po metodi Vickers [31] | 41 |
| Slika 22. Uređaj za optičku emisijsku spektrometriju s tinjajućim izbojem | 42 |
| Slika 23. Mehanizam pobude atoma uzorka kod GD-OES analize [32] | 43 |
| Slika 24. Shematski prikaz spektrometra u GD-OES uređaju [32] | 44 |
| Slika 25. Prikaz dijela jarbola iz kojeg su izrezivane epruvete | 45 |
| Slika 26. Prikaz epruveta spremnih za mehanička ispitivanja | 45 |

| | |
|--|----|
| Slika 27. Skica prema kojoj su se izrezivale epruvete..... | 46 |
| Slika 28. Cijev jarbola s označenim epruvetama za izrezivanje..... | 46 |
| Slika 29. Prikaz turpijanja viška materijala i formiranja ispitne duljine | 47 |
| Slika 30. Prikaz univerzalne kidalice WPM EU 40 mod u Laboratoriju za mehanička ispitivanja | 47 |
| Slika 31. Epruveta s označenom ispitnom duljinom u zahvatu univerzalne kidalice..... | 48 |
| Slika 32. Ekstenziometar..... | 48 |
| Slika 33. Dijagram Sila - Produljenje za ispitne epruvete..... | 49 |
| Slika 34. Prikaz uzorka Al 7075 + 20 % SiC prije rezanja vodenim mlazom..... | 50 |
| Slika 35. Dijagram usporedbe iznosa granice razvlačenja među uzorcima..... | 51 |
| Slika 36. Dijagrami (A) vlačne čvrstoće R_m i (B) modula elastičnosti E među uzorcima..... | 52 |
| Slika 37. Dijagram istezljivosti među uzorcima..... | 52 |
| Slika 38. Prikaz zalivenih uzoraka Al-legure spremnih za metalografsku analizu; A)uzdužno; B)poprečno | 53 |
| Slika 39. Prikaz uzoraka Al-SiC kompozita spremnih za metalografsku analizu; A) uzdužno, B) poprijeko..... | 55 |
| Slika 40. Prikaz sučelja programskog paketa Autodesk Inventor 2013 | 60 |
| Slika 41. Modelirani jarbol sa silama $F_1=100N$, $F_2=200N$ | 60 |
| Slika 42. Vizualizacija naprezanja na modeliranom jarbolu od Al-legure bez dodatka čestica..... | 61 |
| Slika 43. Progibi jarbola od Al-legure bez dodatka čestica..... | 62 |
| Slika 44. Progibi jarbola od Al-SiC kompozita..... | 63 |
| Slika 45. Dijagram progiba među analiziranim materijalima..... | 64 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Mehanička svojstva AlMg _{2,5} legure [28] | 29 |
| Tablica 2. Prikaz rezultata mehaničkih ispitivanja za 3 epruvete..... | 49 |
| Tablica 3. Mehanička svojstva za uzorak Al 7075+20%SiC | 50 |
| Tablica 4. Slike mikrostrukture uzorka Al-legure bez dodatka čestica za poprečni i uzdužni presjek u nagriženom stanju..... | 53 |
| Tablica 5. Prikazi uzoraka Al-SiC kompozita za poprečni i uzdužni presjek, u nagriženom stanju | 56 |
| Tablica 6. Prikaz rezultata mjerenja tvrdoće po Vickersu za Al-leguru bez dodatka čestica, za uzdužni i poprečni smjer | 58 |
| Tablica 7. Prikaz rezultata mjerenja tvrdoće po Vickersu Al-SiC kompozita za uzdužni i poprečni smjer | 58 |
| Tablica 8. Rezultati kvantitativne analize za uzorak Al-SiC kompozita i uzorak Al-legure..... | 59 |
| Tablica 9. Rezultati statičke analize metodom konačnih elemenata za uzorak Al-legure..... | 61 |
| Tablica 10. Rezultati statičke analize metodom konačnih elemenata za uzorak s dodatkom SiC čestica | 62 |
| Tablica 11. Vrijednosti najvećeg progiba za Al- leguru i Al-SiC kompozit | 63 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|-----------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| ρ | kg/m^3 | gustoća |
| ρ/ρ_s | | relativna gustoća |
| E | GPa | modul elastičnosti |
| E_f | GPa | modul savitljivosti |
| G | GPa | modul smičnosti |
| R_{mt} | MPa | tlačna čvrstoća |
| R_e | MPa | granica razvlačenja |
| R_m | MPa | vlačna čvrstoća |
| R_d | MPa | dinamička izdržljivost |
| K_{IC} | $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ | lomna žilavost |
| KU | J | udarni rad loma |
| T_m | K | talište |
| T_{maks} | K | maksimalna radna temperatura |
| T_{min} | K | minimalna radna temperatura |
| c_p | J/kgK | specifični toplinski kapacitet |
| λ | W/mK | toplinska vodljivost |
| α | $10^{-6}/\text{K}$ | toplinska rastezljivost |
| L | kJ/kg | latentna toplota taljenja |
| m | kg | masa |
| V | m^3 | volumen |
| η^e | % | faktor gubitka |
| ν | | Poissonov faktor |
| H | | tvrdoća |
| ε_d | | deformacija pri zgušnjavanju |
| ε_f | | vlačna duktilnost |
| R | m | radijus većeg promjera cijevi kalupa |
| r | m | radijus manjeg promjera cijevi kalupa |

SAŽETAK

Fizikalna i mehanička svojstva koja se mogu ostvariti kompozitima s metalnom matricom, čine ih izrazito zanimljivim materijalima za primjenu u zrakoplovnoj industriji, automobilske industriji i raznim drugim primjenama. U zadnje vrijeme, kompoziti s metalnom matricom ojačani s česticama su privukli veliku pažnju zbog svoje relativno niske cijene i karakterističnih izotropnih svojstava. Materijali za ojačanje kompozita s metalnom matricom uključuju čestice poput karbida, nitrida i oksida. U zadnjih 20 godina u nastojanju da se optimizira struktura i svojstva kompozita s metalnom matricom, razvili su se različiti postupci obrade. U primjeni ovi materijali stoga pokazuju vrlo zanimljiva svojstva koja se mogu iskoristiti u razne svrhe, a u ovom radu je istražena uporaba kompozita od aluminijske legure, ojačane s 20 % SiC čestica za izradu jarbola sportske jedrilice. Izvedena su ispitivanja mehaničkih svojstava i tvrdoće, te metalografske i kvantitativne analize. Uporabom programskog paketa koji je omogućio analizu metodom konačnih elemenata uočen je veliki potencijal koji ima ispitani kompozit s metalnom matricom.

Ključne riječi: jarbol, kompoziti s metalnom matricom, ojačanje u obliku čestica, MKE analiza

SUMMARY

The physical and mechanical properties that can be obtained with metal matrix composites (MMCs) have made them attractive candidate materials for aerospace, automotive and numerous other applications. More recently, particulate reinforced MMCs have attracted considerable attention as a result of their relatively low costs and characteristic isotropic properties. Reinforcement materials include carbides, nitrides and oxides. In an effort to optimize the structure and properties of particulate reinforced MMCs various processing techniques have evolved over the last 20 years.

In application these materials therefore show very interesting properties that can be utilized for various purposes. This thesis shows an investigation of an idea for using an aluminum alloy, strengthened with 20 % SiC particles, as a mast for sailboats in Laser class.

Various testings were conducted that include mechanical properties testings, hardness testing, and analysis like metallographic, and quantitative spectrometric analysis with glow discharge. Also by using software a finite element method analysis (FEM) is used and it showed possible potential that lays within the metal matrix composites reinforced with particles, in general.

Keywords: mast, Sailboat, Metal Matrix Composites, reinforcement with particles, FEM analysis

1. UVOD

Kompozitne tvorevine se smatraju novim materijalima, nešto čiji je ozbiljni razvoj tek započeo, a poznato je da su uvelike obilježili drugu polovicu 20. stoljeća. Međutim, sagleda li se izrada oružja i oruđa kroz ljudsku povijest i njihova uporaba, može se doći do iznenađujućih zaključaka. U antičko doba, poznato je da se luk za ispaljivanje strijela izrađivao od kompozita s prirodnim materijalima. Poznata je i uporaba kompozitnih tvorevina u izradi čamaca u antičkom dobu, a koristili su se i u druge svrhe. Očito, ljudima kroz povijest je bilo jasno da spajanjem nekih raznorodnih materijala, ukupno ponašanje konstrukcije se bitno može mijenjati. Pojavom prvih umjetnih materijala koje nazivamo polimerima poput vinila, polistirena, fenolnih i poliesterskih smola, kompoziti doživljavaju drugi procvat u razvoju i primjeni. Koncept samog kompozitnog materijala se dakle utemeljuje razvojem polimernih, ali i drugi materijali nisu izostali iz tog razvoja. Tijekom istraživanja na području polimernih kompozita, usporedno se razvijaju kompoziti i od drugih materijala, poput na primjer; kompozita s metalnom matricom.

Razvoj kompozita s takvom matricom je bio jednako zanimljiv, iako doduše puno sporiji od onoga s polimernom matricom. Iako se smatra kako je tek prije 40-ak godina započeo razvoj takvih metalnih kompozita, povijest nas opet može iznenaditi. Primjeri kompozitnih tvorevina s metalnom matricom se mogu naći u arheološkim iskopinama područja na kojem su obitavale antičke civilizacije. Bakrena šila pronađena na području Cayona, naselja iz neolitika u današnjoj Turskoj, potječu iz 7000. godine prije Krista. Izrađene su tehnikom laminacije i kovanjem, a to je omogućilo visoke razine izduženih nemetalnih uključaka. Međutim, među prvim kompozitima s metalnom matricom koji su privukli pažnju sa znanstvene, ali i praktične strane u moderno doba, su bili metalni sustavi očvršnuti disperziranim česticama. Nastaju radom gospodina Schmidta oko 1924. godine, koji je istraživao smjese aluminijskih praškova, a dovode do opsežnih istraživanja u 50-im i 60-im godinama prošloga stoljeća [1].

Napretkom tehnologije metalni kompoziti su se dalje istraživali, i pokazuju neka superiorna svojstva naspram ostalih kompozitnih vrsta materijala. Područje primjene im je relativno široko, a uključuje automobilsku, zrakoplovnu i pomorsku industriju, te razne primjene u vojnoj tehnici.

2. KOMPOZITNE TVOREVINE

Kompozitni materijali ili ukratko kompoziti, proizvedeni su umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem dobivanja materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe. Tim putem se mogu postići neobične, odnosno kod drugih materijala neuobičajene kombinacije svojstava, kao što su krutost, čvrstoća, težina, ponašanje pri visokim temperaturama, kemijska postojanost (antikorozivnost), tvrdoća ili vodljivost (električna ili toplinska) [2].

Kompoziti mogu biti:

- metalno-metalni
- metalno-keramički
- metalno-polimerni
- keramičko-polimerni
- keramičko-keramički
- polimerno-polimerni
- polimerno-metalni.

Upravo navedeno vodi nas do temeljne podjele kompozita na:

- metalne,
- keramičke,
- polimerne i
- ugljične¹

Kod toga se pretpostavlja da su osnova (u daljnjem tekstu matrica): metali, keramika, odnosno polimeri, kojoj se pridodaju najrazličitiji dodaci u cilju modificiranja svojstava matrice, odnosno postizanja cilja koje je naveden u definiciji – da se dobije materijal svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe.

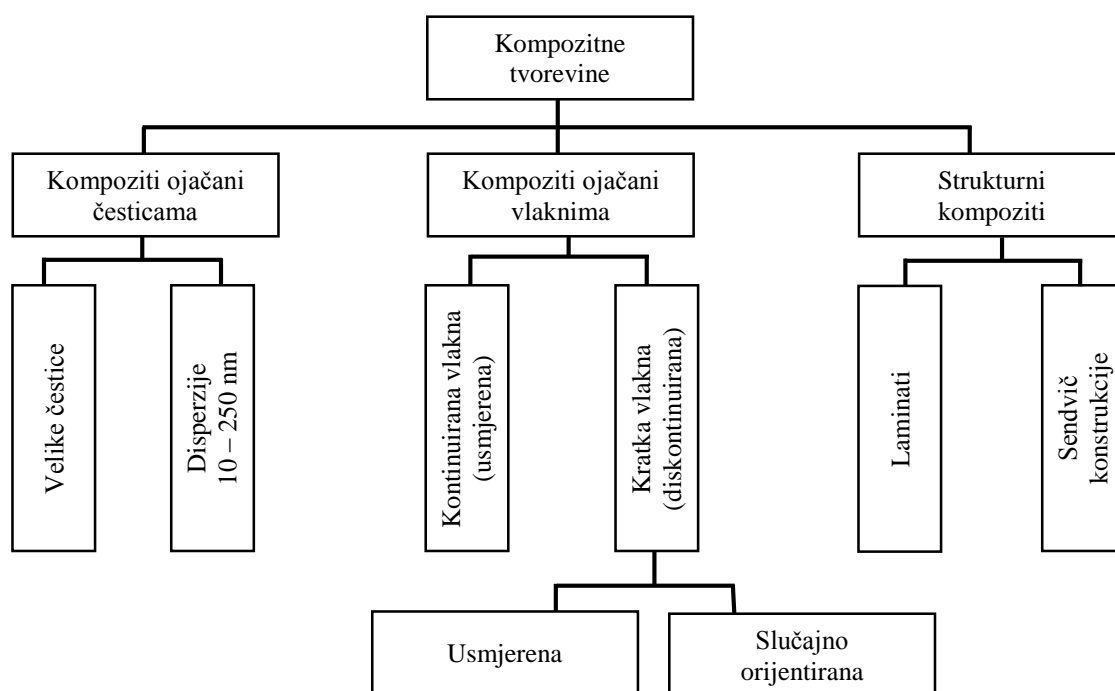
¹ Ugljični kompoziti se prema nekim autorima mogu pojaviti kao dio kompozita s keramičkom osnovom.

Dakle kompoziti su umjetno proizvedeni višefazni materijali koji imaju željenu kombinaciju najboljih svojstava konstitutivnih faza. Obično, jedna faza (matrica) je kontinuirana i okružuje ostale (disperzirane faze).

Daljom podjelom, kompozite možemo podijeliti s obzirom na način ojačanja i konstrukciju:

- kompozite s česticama,
- vlaknima ojačane kompozite
- slojevite kompozite i sendvič konstrukcije [2].

Na slici 1. shematski je prikazana podjela kompozitnih tvorevina za detaljniji pregled i vizualizaciju podjele.



Slika 1. Prikaz općenite podjele kompozitnih tvorevina [2]

Jednostavno rečeno, kompoziti su materijali koji se sastoje od dvaju kemijski različitih konstituenata, na makro skali, te posjeduju jasno izraženu granicu između tih konstituenata. Također, literature mogu razlikovati kontinuiranu i diskontinuiranu fazu, koji su drugi nazivi za matricu i ojačalo (punilo) [3].

Ukupno ponašanje kompozita ovisi o:

1. Svojstvima matrice i ojačala (punila),
2. Veličini i rasporedu (raspodjeli) konstituenata,
3. Volumnom udjelu konstituenata,
4. Obliku konstituenata,
5. Prirodi i jakosti veza među konstituentima [2].

Mehanizmi očvršnuća koji vrijede za homogene metalne legure u pravilu se teško mogu primijeniti na kompozitne materijale. Umjesto toga kompoziti se „dizajniraju“ (projektiraju, komponiraju, sastavljaju) u cilju pripremanja neobičnih (neuobičajenih) kombinacija svojstava, koja se ne mogu postići uobičajenim metodama utjecanja na mikrostrukturu i mehaničkim svojstvima. To osobito vrijedi za laminirane kompozite i kompozite s česticama koji se velikim dijelom uvijek projektiraju u cilju ispunjavanja posebnih zahtjeva, a ne samo zahtjeva u pogledu čvrstoće [2].

2.1. Materijali za izradu komponenata kompozita

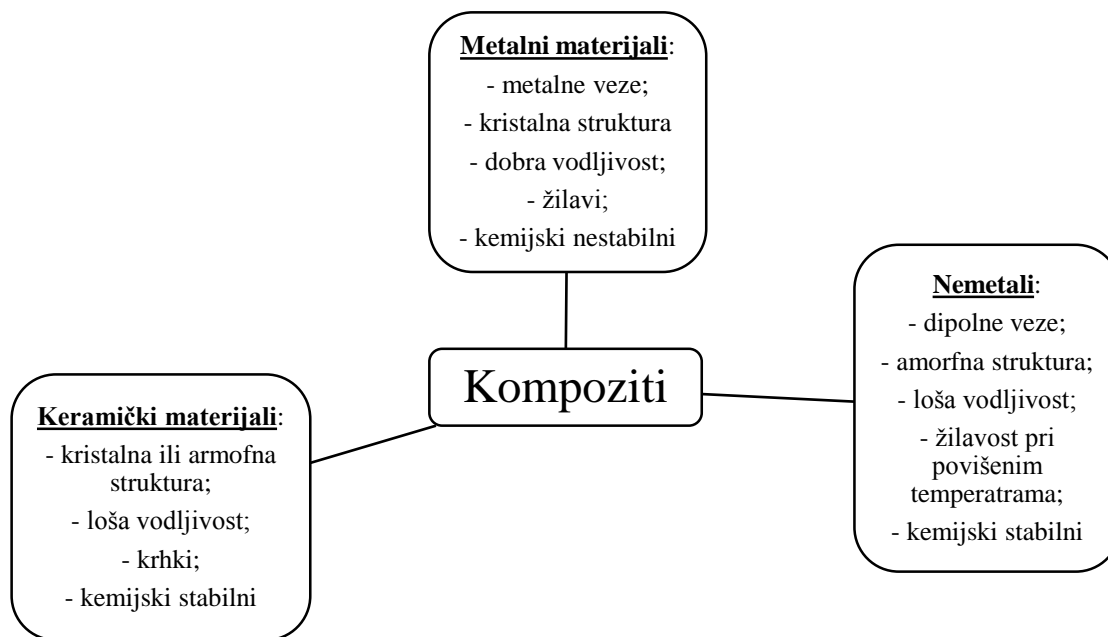
Kompozitne tvorevine se sastoje od dvije ili više komponenata, odnosno jasno razlučivih faza. Jedna faza se naziva matrica (ili *osnova*), a druga je ojačalo, odnosno punilo. Može biti i više ojačala, a najčešće je samo jedna matrica, te se svaki od konstituenata može i obično se izrađuje od drugačijih materijala.

Općenito, materijale za izradu komponenata kompozita možemo podijeliti na:

- Umjetne, odnosno sintetske – koji su trenutačno najzastupljeniji u primjeni, i
- Biološki prihvatljive, prirodne – koji se rijetko koriste u izradi kompozita.

Mogućnost kombiniranja različitih vrsta materijalnih sustava (metal – keramika – nemetal) otvara vrata neograničenom broju različitih varijacija. Svojstva tih novih materijala su temeljno određeni svojstvima njihovih pojedinih komponenata [4].

Na slici 2. prikazana je podjela područja materijala iz kojih se najčešće izrađuju, odnosno kombiniraju kompoziti, uz naznaku nekih svojstava.



Slika 2. Prikaz područja iz kojih se najčešće kombiniraju kompoziti s navedenim nekim svojstvima [4]

2.1.1. Matrice – materijali i zadaća

Materijali za izradu matrica kompozita mogu biti raznih vrsta, poput metala, keramike ili najčešće – polimera. Njihova učestalost u primjeni je visoka zbog niskih troškova proizvodnje, lakoće izvodljivosti složenih dijelova i to bez puno završnih obrada odvajanjem čestica. Dakako, zgodno je napomenuti da iako se smatra kako su polimeri puno zastupljeniji od recimo metala pri izradi matrica, to je zbog toga što istraživanja na tom području uporabe metalnih materijala je još u povojima. Usporedi li se općeniti razvoj metalnih i polimernih matrica, smatra se kako su polimerne matrice otprilike 15 godina ispred metalnih. Trenutačno, istraživanjem i razvojem se daje velika pažnja metalnim materijalima kao materijalima matrice, ali postoji još veliki broj tehničkih i tehnoloških problema koje treba riješiti [5].

Matrica ima nekoliko zadaća. Povezuje ojačalo, te služi kao medij kojim se izvana nametnuto naprezanje prenosi i raspoređuje na ojačalo; vrlo mali dio nametnutog opterećenja nosi matrica. Materijal koji se koristi poželjno je da posjeduje svojstvo duktilnosti. Modul elastičnosti ojačala, prema tome, treba biti mnogo viši od modula elastičnosti matrice.

Sljedeća funkcija matrice je da zaštiti ojačalo od površinskih oštećenja do kojih može doći mehaničkom abrazijom ili kemijskim reakcijama od strane okolnog medija. Takve

interakcije mogu izazvati tečenje na površini koje može voditi do pukotina, a one mogu voditi do oštećivanja pri nižim vlačnim naprezanjima. Posljedica tog procesa je odvajanje matrice od ojačala, te zbog svoje relativne mekoće i plastičnosti omogućuje propagiranje krhkog loma – dovodi do krhkog loma. Prema tome, jedna od glavnih zadaća matrice je sprječavanje napredovanja pukotinama.

Konkretno, slab izbor kompozita s metalnom matricom u prošlosti se zasnivao na činjenici da su metalne matrice izrazito skupe za izradu i kasniju obradu, međutim danas je situacija nešto drugačija. Odabir je usko određen namjenom koju će konačni kompozit vršiti. Razvoj tehnologija proizvodnje lakih metala, te njihovom komercijalizacijom omogućuje se nešto češća uporaba kompozita s metalnom matricom [6].

2.1.2. Ojačanja – materijali i zadaće

Primjenom ojačanja mogu se ostvariti različiti ciljevi, posebice ako se ojačavaju kompoziti s matricom od lakih metala. Tada nam se otvara veliki broj mogućih primjena ovih materijala u najrazličitijim područjima, naročito tamo gdje je masa konstrukcije najvažniji zahtjev. Ispunjenje tog, a i drugih zahtjeva se može ostvariti kroz poboljšavanje svojstava komponenata kompozita s metalnom matricom [6].

Razvojni ciljevi prilikom proizvodnje kompozita s matricom od lakih metala su:

- Porast vlačne i tlačne čvrstoće na sobnoj temperaturi kao i iznad nje, održavajući minimalnu duktilnost,
- Porast otpornosti na puzanje pri povišenim temperaturama u usporedbi s konvencionalnim legurama),
- Porast otpornosti na umor materijala posebice pri povišenim temperaturama,
- Poboljšanje otpornosti na toplinski šok,
- Poboljšanje otpornosti na koroziju,
- Porast modula elastičnosti,
- Smanjenje toplinskog razvlačenja (dilatacije) [6].

Osim navedenih razvojnih ciljeva za različite primjene se mogu značajno mijenjati, pa tako na primjer u medicinskoj tehnologiji zahtjevi poput ekstremne korozijske otpornosti kao i visoka bio-kompatibilnost se podrazumijevaju.

2.1.2.1. Materijali i zadaće vlakana

Vlakna preuzimaju na sebe glavninu naprezanja i osiguravaju čvrstoću i krutost kompozita, te kao i matrica, mogu biti izrađena od umjetnih i prirodnih materijala. Vlakna trebaju biti čvrsta, kruta i lagana, a visoko talište je jedno od poželjnih svojstava. Glavne zadaće vlakana su stoga povišenje čvrstoće i krutosti kompozita. Materijali koji se rabe u obliku vlakana za armiranje obično imaju visoku vlačnu čvrstoću [2].

Vlakna svrstavamo u tri skupine:

- Viskeri – sićušni monokristali koji imaju ekstremno visok omjer duljina/promjer. Posljedica malih dimenzija je visok udio pravilnosti kristalne građe, pa gotovo nema mogućnosti tečenja, što dovodi do izuzetno visoke čvrstoće. Izrađeni su najčešće od silicijevog nitrida, aluminijevog oksida, te grafita.
- Vlakna – polikristalna ili amorfna te imaju mali promjer. Općenito mogu biti keramički ili polimerni. Izrađuju se od aramida, ugljika, E-stakla ili silicijevog karbida.
- Žice – mogu biti čelične, Mo ili W, te su u usporedbi relativno velikog promjera [2].

2.1.2.2. Materijali i zadaća ojačala u obliku čestica – punila

Izraz kojim se nazivaju razni dodaci u obliku čestica u raznim matricama jest punilo, dok se u nekoj literaturi može naići i na naziv funkcionalno punilo. Takav termin se osmislio kako bi predstavljao diskontinuirane dodatke, njihovu formu, oblik i nekad površinski kemijski sastav, a ponajviše kako bi se naglasilo da imaju značajniju ulogu od pukog smanjenja troškova. Punila mogu biti prikladno modificirana u cilju poboljšavanja mehaničkih svojstava i to najčešće čvrstoće [7].

Ojačanje u obliku čestica, odnosno punila se tradicionalno većinom smatraju aditivima, odnosno dodacima. Njihov najveći doprinos je u smanjenju troškova materijala, a pored toga

još omogućuju i kraća vremena kalupljenja što je rezultat povećane toplinske vodljivosti, te kod polimernih matrica, smanjenje otpada zbog deformacija.

Neki od glavnih razloga za uporabu punila s česticama:

- Smanjenje troškova,
- Poboljšanje proces proizvodnje,
- Kontrola gustoće,
- Toplinska provodljivost,
- Kontrola toplinske rastezljivosti,
- Elektrostatička svojstva, antistatici,
- Magnetska svojstva,
- Onemogućavanje gorivosti,
- Poboljšanje mehaničkih svojstava, najviše tvrdoće i otpornosti na abraziju [8].

Naravno, treba napomenuti kako nije moguće s jednim punilom postići sve navedene prednosti. Svaka vrsta čestica može imati povoljno djelovanje na jedna svojstva dok ima nikakva ili čak negativna djelovanja na neka druga svojstva. Ukupan utjecaj na svojstva, kao niti mogućnost predviđanja svojstva nakon dodavanja punila nije lako za predvidjeti, pošto ona ne ovise samo o punilu. Krajnja svojstva uvelike ovise i o veličini čestice, njenom obliku i o kemijskom sastavu površine [8].

Diskretne, jednolično raspoređene čestice daju tvrd i krhak materijal, pa ih je potrebno obaviti mehanijom i duktilnijom matricom. U stvari struktura nalikuje onoj mnogih dvofaznih disperzijski ojačanih metalnih legura.

Obzirom na veličinu čestica i način na koji čestice utječu na svojstva kompozita, kompoziti s česticama se dijele u dvije velike skupine:

- Kompozite s disperzijom – mala veličina čestice, promjera od 10 nm do 250 nm,
- Kompozite s velikim česticama – promjeri od 1 μ m na više [2].

Kod kompozita s disperzijom, povišena čvrstoća postiže se ekstremno malim česticama disperzirane faze, koje usporavaju gibanje dislokacija. Razmatranje ovog mehanizma očvršćivanja je na nivou atoma. Kod kompozita s velikim česticama mehanička svojstva su poboljšana djelovanjem samih čestica [2]. Širok spektar prirodnih ili sintetskih krutih čestica, organske ili anorganske se već komercijalno koriste kao punilo za ojačanje kompozita na bazi polimera. Dok su keramički prahovi poput Al_2O_3 , SiC , SiO_2 , TiO_2 i slični u širokoj uporabi kao konvencionalna punila, uporaba industrijskog otpada, šljake i sličnog sitnog otpada u ulozi punila se rijetko može naći [3].

Optimiranje svojstava disperzijom ojačanih kompozita je moguće uz uzimanje u obzir sljedećih smjernica:

1. Dispergirana (raspršena) faza treba biti djelotvorna zapreka klizanju (smicanju);
2. Materijal koji služi kao disperzija treba biti optimalne veličine, oblika, raspodjele i udjela;
3. Disperzirani materijal treba biti male topljivosti u materijalu matrice, te ne smije doći do kemijskih reakcija između dispergirane faze i matrice;
4. Između matrice i dispergiranog materijala treba biti dobra adhezija [2].

2.2. Kompoziti s metalnom matricom

Metalni kompozitni materijali nalaze široku primjenu u raznim dijelovima svakodnevnog života kroz već dulje vrijeme. Često se niti ne uočava da je u nekoj praktičnoj primjeni uporabljen kompozitni materijal. Ovi materijali su najčešće proizvedeni *in situ* formom iz konvencionalnih proizvodnih tehnologija metala. Zgodno bi bilo ovdje spomenuti mač iz Damaska sa svojom izmjeničnom (krivolinijskom) strukturom koja je dobivena kovačkim zavarivanjem dvije vrste čelika. Materijali poput sivog lijeva s grafitom ili čelik s visokim udjelom karbida kao i oni s recimo wolframovim karbidima, te raznim metalnim vezivima također mogu spadati u ovu grupu kompozitnih materijala [6].

Značajan napredak u pogledu razvoja kompozita s matricom od lakih metala doživljava procvat u zadnjim desetljećima 20. stoljeća. Zbog toga su takvi materijali uvedeni u najvažnije primjene poput prometnog inženjerstva, a posebice u automobilske industriji. Komercijalno

im je poznata uporaba u vlaknima ojačanim klipovima motora s unutarnjim izgaranjem, te kao česticama ojačanim kočionim diskovima.

Ovi inovativni materijali otvaraju beskonačne mogućnosti za modernu znanost o materijalima i njihov razvoj; karakteristike kompozita s metalnom matricom mogu biti skrojene, konstruirane u materijal ovisno o njenoj primjeni. Zbog navedenog potencijala kompoziti s metalnom matricom mogu zadovoljiti gotovo sve koncepcije konstruktora, stoga ne čudi činjenica da su interesantni za primjenu kao konstrukcijski i funkcionalni dijelovi tj. materijali.

Nažalost, tehnologije proizvodnje kompozita s metalnom matricom se suočavaju s ozbiljnom konkurencijom u pogledu ostalih modernih tehnologija proizvodnje materijala; kao što je na primjer metalurgija praha. Prednosti kompozitnih materijala dolaze do izražaja samo kada je odnos (omjer) troška i dobivenih svojstava prihvatljiv [6].

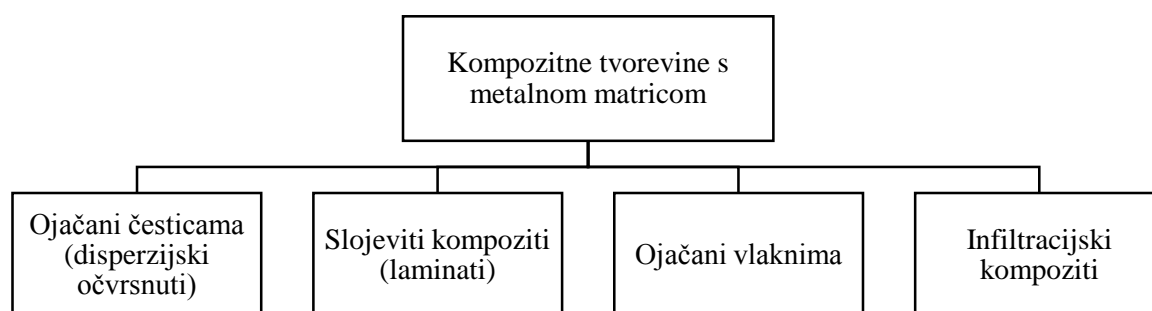
Matrica ovakvih kompozita najčešće je duktilan materijal, a njihovo je svojstvo da se mogu primjenjivati pri višim radnim temperaturama nego ta sama metalna matrica [2].

Iako se razvoj kompozita s metalnom matricom smatra još u začecima, ipak imaju neke prednosti pred najpopularnijim - kompozitima s polimernom matricom o kojima je do sada napravljen značajno dulji i detaljni razvoj, odnosno veći obujam istraživanja [6].

Spomenute prednosti uključuju: primjenu pri povišenim temperaturama, negorivost, te veću otpornost prema degradaciji uzrokovano djelovanjem organskih kapljevina. Međutim, kompoziti s metalnom matricom znatno su skuplji od onih s polimernom matricom, pa je njihova uporaba u tom pogledu ograničena [2].

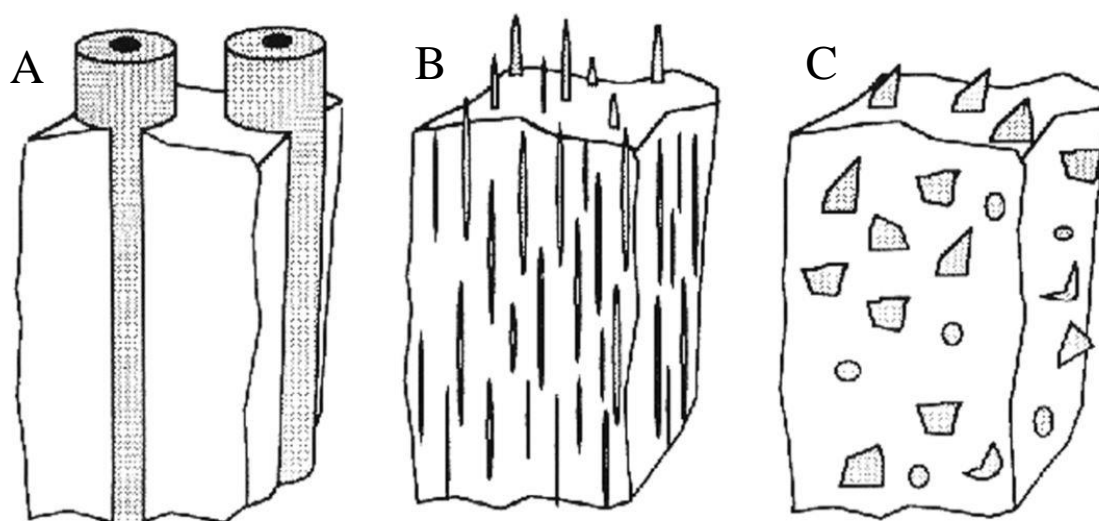
Kompoziti s metalnom matricom se mogu klasificirati u nekoliko različitih podjela, a neke od njih primarno uzimaju u obzir vrstu i doprinos ojačavanja. Prema tome mogu se podijeliti s obzirom na to jesu li ojačani česticama, slojevito, vlaknima ili infiltriranim materijalima.

Na slici 3. prikazana je podjela kompozita s metalnom matricom s obzirom na vrstu ojačavanja.



Slika 3. Prikaz klasifikacije kompozita s metalnom matricom [1]

Općenito, kompoziti ojačani vlaknima se još dodatno mogu podijeliti na one ojačane kontinuiranim vlaknima, koja mogu biti jednožilna ili višežilna. Također, mogu biti i ojačani s kratkim vlaknima, odnosno viskerima, koji pak mogu biti orijentirani ili slučajno postavljeni [6]. Na slici 4. je shematski prikazana razlika među takvim vrstima ojačanja kompozita s metalnom matricom.



Slika 4. Prikaz različitih oblika ojačavanja kompozita s metalnom matricom; (A) Kontinuirana vlakna, (B) Diskontinuirana vlakna (viskeri), (C) Čestice [1]

2.2.1. Postupci proizvodnje i obrade kompozita s metalnom matricom

Veliki je broj tehnika kojima se mogu proizvesti kompoziti s metalnom matricom. U žarištu odabira prikladnog procesa za izradu kompozita s metalnom matricom je željena vrsta,

količina i raspodijeljenost komponenata za ojačanje (bilo da se radi o vlaknima ili česticama). Varijacijama u pogledu proizvodnog postupka, obrade i završne obrade, kao i vrstom ojačala, moguće je dobiti drastično različite karakteristike i svojstva. Pri tome, treba napomenuti da nije potrebno mijenjati udio i sastav komponenata, svojstva će svejedno biti drugačija. Proizvodnja prikladnog prekursora, obrada do tolerancijske mjere ili poluproizvod i završna obrada moraju biti odvojene [9]. Kako bi se značajno smanjili troškovi, prilikom obrade se koriste poluproizvodi koji su gotovo konačnih dimenzija (*near net shape*), u svrhu smanjenja završne obrade [4].

Postupci proizvodnje kojima se mogu izraditi kompoziti s metalnom matricom su:

- Postupci u tekućem stanju:
 - lijevanje miješanjem,
 - oblikovanje u poluskrućenom stanju,
 - infiltracija rastaljenog metala,
 - spontanom infiltracijom,
 - prisilnom infiltracijom – koja uključuje postupke: infiltracije stlačenim plinom, vakuumske infiltracije, infiltracije mehaničkim pritiskom, centrifugalne infiltracije, ultrazvučne infiltracije,
 - lijevanje – koje je najraširenije i uključuje postupke: kokilnog, tlačnog, centrifugalnog, te lijevanja tiskanjem (eng.: *squeeze casting*),
 - brzo skrućivanje,
 - oblikovanje naštrcavanjem.
- Postupci u čvrstom stanju
 - difuzijsko spajanje
 - metalurgija praha
 - hladno prešanje prahova
 - visokotemperaturna sinteza prahova – vruće prešanje (HP) i vruće izostatičko prešanje (HIP).
- Postupci prevlačenja:
 - prevlačenje naštrcavanjem

- taloženje iz parne faze
- elektrolitičko [10].

Također, u novije vrijeme prilikom obrada u tekućem stanju, često su prisutne razne obrade u poluskrućenom stanju poput Thixocasting-a ili Thixoforming-a, kao i tipično ekstrudiranje dijelova. Postupci spajanja poluproizvoda najčešće uključuju zavarivanje i slične tehnike, dok hladno kovanje i superplastično oblikovanje je nešto rjeđe u primjeni [11].

U današnje vrijeme kompoziti s metalnom matricom se uglavnom najčešće proizvode metalurgijom u tekućem stanju, te ona ima veći tehnički značaj od metalurgije praha. Uglavnom razlozi su sadržani unutar ekonomskih stajališta, ali ima prednost u pogledu uporabe dobro poznatih ljevačkih procesa.

Naposljetku, najčešći postupci proizvodnje u tekućem stanju su:

- lijevanje miješanjem (odnosno lijevanje miješanjem u poluskrućenom stanju; to jest *compo-casting*),
- prisilna infiltracija stlačenom plinom, te
- lijevanje tiskanjem (odnosno *squeeze casting*) [12].

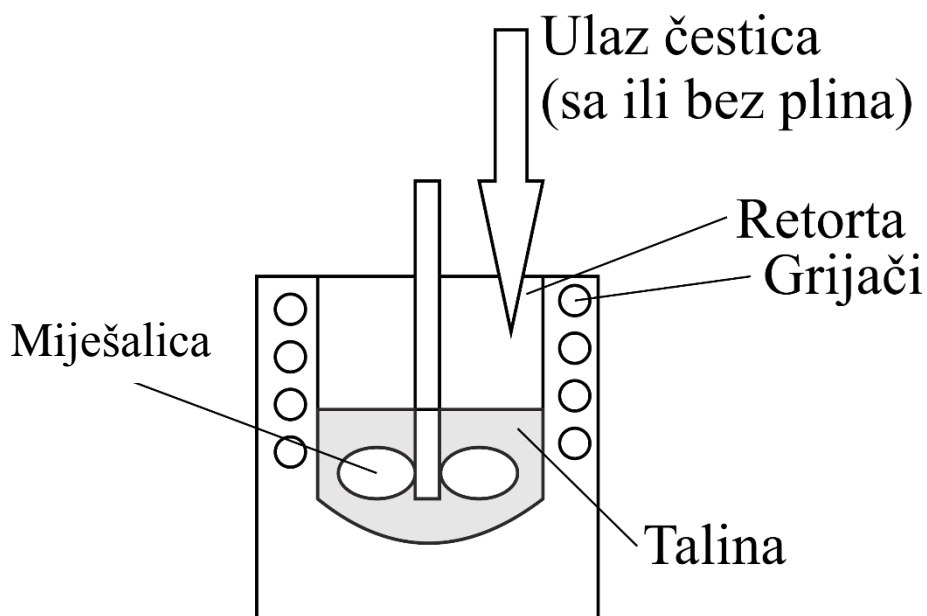
2.2.1.1. Lijevanje miješanjem

Postupci poput lijevanja miješanjem, odnosno lijevanja u poluskrućenom stanju (*compo-casting*) se koriste kako bi se umiješale čestice u talinu lake legure. Jedina razlika između njih je u temperaturi taline i u silama miješanja, koje su veće kod poluskrućenog stanja taline. Pa tako, kod lijevanja miješanjem je talina na temperaturi likvidusa, a kod poluskrućenog stanja talina se drži u nekom intervalu između solidusa i likvidusa. Čestice često imaju afinitet prema stvaranju aglomerata, odnosno nakupina, koje mogu biti otopljene samo intenzivnim miješenjem. Međutim, potrebno je napomenuti kako ulazak plina u talinu mora biti potpuno spriječen, obzirom da bi mogao dovesti do neželjenih reakcija ili poroziteta. Potrebno je s pojačanom pažnjom pratiti disperziju ojačavala, u ovom slučaju čestica. Pojačana pažnja se preporuča iz razloga što je reaktivnost komponenata povezana s temperaturom taline, te vremenom trajanja miješanja, što se mora koordinirati za uspješnu proizvodnju. Ukoliko

koordinacija navedenih komponenata nije provedena s dovoljno pažnje, može se uzrokovati reakcije između taline i ojačala, što najčešće dovodi do otapanja ojačala u matrici.

Zbog nižeg omjera površine i volumena sitnih kuglastih čestica, reaktivnost je obično manje kritična s miješanim česticama u odnosu na recimo - vlakna. Potom, talina može biti neposredno lijevana, ili se može dodatno obraditi nekim alternativnim postupcima poput lijevanja tiskanjem, te Thixocasting-a [9]. Postupak je relativno jeftin, a bit postupka je što ravnomjernija raspodjela ojačala u matrici. Problemi se mogu javiti prilikom lijevanja mješavine zbog povećane viskoznosti [10].

Na slici 5. shematski je prikazana izrada kompozita s metalnom matricom postupkom lijevanja miješanjem.



Slika 5. Shematski prikaz postupka lijevanja miješanjem

2.2.1.2. Infiltracija stlačenim plinom

U ovom postupku talina popunjava prostor predoblika pod tlakom koji ju tlači izvana. Plin koji vrši tlačenje mora biti inertan s obzirom na matricu koja se koristi. Taljenje matrice i infiltrirajućeg materijala se vrši u tlačnoj posudi.

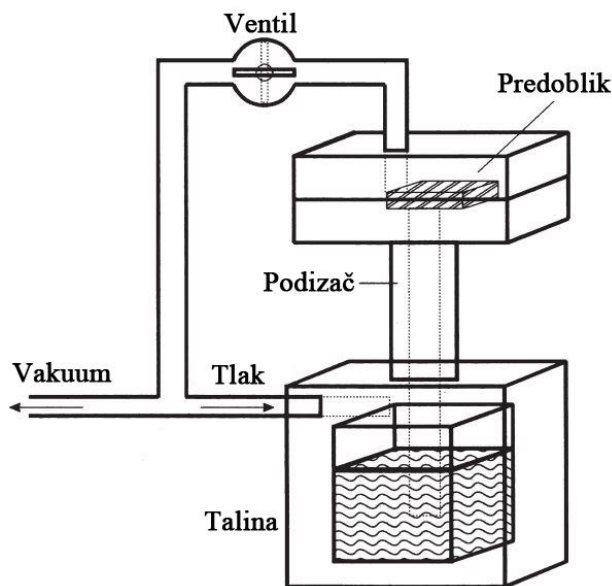
Postoje dvije varijante postupka infiltracije stlačenim plinom. Prva varijanta uključuje postupak zagrijavanja predoblika koji se takav ubacuje (umače) u talinu, dok je tlak primijenjen na površinu taline. Ovaj infiltracijski postupak, je dakle ovisan o kvašenju predoblika, a ono ovisi o volumnom udjelu ojačala.

Druga varijanta postupka ima obrnuti redoslijed; rastaljena kupka je tlačena na predoblik tlakom inertnog plina uporabom cijevi koja napaja retortu plinom. Prednost ovog postupka je u tome što nema razvoja poroziteta. Obzirom da je reakcijsko vrijeme je relativno kratko za spomenute varijante postupka, mogu se upotrijebiti materijali matrice i ojačala koji bi u postupku poput compo-castinga bilo nemoguće upotrijebiti zbog njihove reaktivnosti. Međutim, još uvijek treba pripaziti oko odabira materijala matrice i ojačala, kako bi se mogao proizvesti kompozitni materijal prikladnih svojstava [13].

Prednosti postupka uključuju:

- nisku cijenu matrice budući da se ne koriste skuplji oblici, kao što je na primjer prah,
- mogućnost proizvodnje vrlo složenih oblika,
- moguća primjena visokih tlakova bitno ubrzava proces čime se skraćuje kemijska reakcija između matrice i ojačanja,
- visokim tlakom je osigurano bolje popunjavanje svih praznina,
- moguća je i infiltracija pri temperaturama nižim od likvidusa matrice što također smanjuje kemijsku reakciju između matrice i ojačanja [10].

Na slici 5. shematski je prikazan postupak izrade kompozita s metalnom matricom postupkom infiltracije stlačenim plinom.



Slika 6. Shematski prikaz postupka infiltracije stlačenim plinom

2.2.1.3. Lijevanje tiskanjem (*Squeeze Casting*)

Jedan je od najčešćih proizvodnih postupaka za izradu kompozita s metalnom matricom. Nakon što talina polako popuni kalup skrućuje se pod vrlo visokim tlakom, a to dovodi do sitnozrnate strukture. U usporedbi s niskotlačnim lijevanjem, kod oblikovanja tiskanjem ne postoji mogućnost za stvaranje plinskih uključaka što u konačnici omogućuje toplinsku obradu tako dobivenih dijelova bez pojave grešaka na površini - blistering [6].

Mogu se razlikovati dvije različite vrste postupka:

- neposredno oblikovanje tiskanjem – direktno, klip je u dodiru s proizvodom,
- posredno oblikovanje tiskanjem – klip nije u dodiru s proizvodom [10].

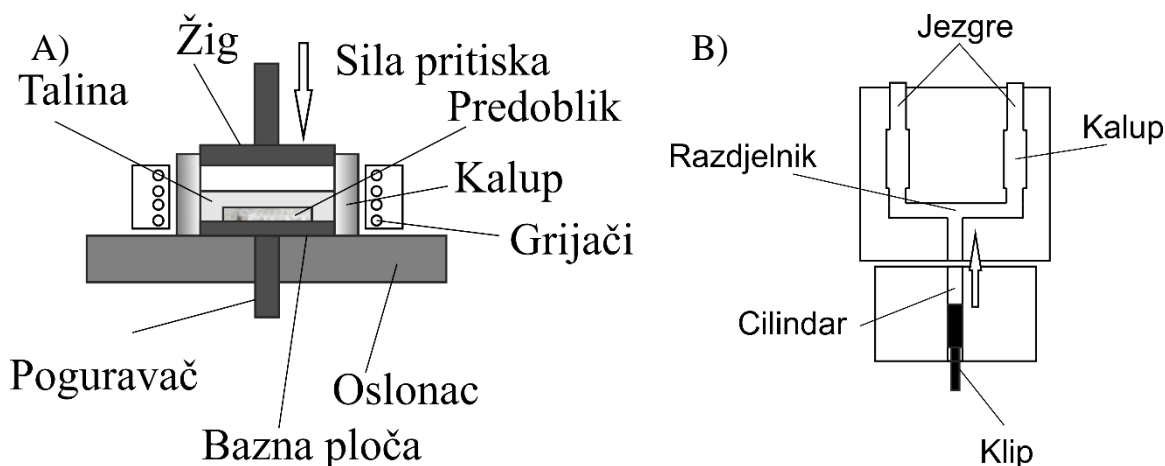
Neposredno oblikovanje tiskanjem se tako naziva jer je klip koji tlači talinu u neposrednom dodiru s njom, te se može smatrati dijelom kalupne šupljine. Pri tome se značajno može pojednostavniti struktura alata za lijevanje. Međutim, neposredno lijevanje ima svojih nedostataka zbog toga što obujam taline mora biti točno određen, jer nema prisutnih odušaka ili nekih sličnih načina za dodavanje ili uklanjanje viška taline. Ostali nedostaci uključuju prisutnost oksidacijskih produkata, koji se formiraju u lijevanom dijelu tijekom doziranja kalupa.

Suprotnost tome je posredno oblikovanje tiskanjem, talina je stlačena u predoblik kroz sustav s vratašcima koja služe kao zaštita, te na njima ostaju neželjeni uključci. U usporedbi s konvencionalnim lijevanjem u kalupe, protok taline u posrednom oblikovanju tiskanjem je značajno manji, ali to omogućuje popunjavanje kalupa s manje turbulentnom talinom.

Oba spomenuta postupka omogućuju proizvodnju kompozita s metalnom matricom s predoblicima koji su načinjeni od čestica (ili vlakana), koji su zaliveni s talinom a ona potom skrućuje pod tlakom. Najčešće se koristi postupak u dvije faze, s time da u prvoj fazi talina se tlači u kalup pri nižem tlaku, a visoki tlak se potom primjeni samo za fazu skrućivanja. Ovako se onemogućuju oštećenja na kalupu zbog prebrze infiltracije. Oblikovanje tiskanjem omogućuje uporabu relativno reaktivnih materijala za matricu i ojačalo, obzirom da vremena trajanja infiltracije su relativno kratka [6].

U konačnici, čak u usporedbi i s visokotlačnim lijevanjem, oblikovanje tiskanjem ima prednosti u pogledu niže gustoće poroziteta, mogućnost toplinske obrade dobivenih dijelova, te konzistentna mehanička svojstva [14]. Dodatne prednosti su mogućnost proizvodnje složenih oblika, te mogućnost parcijalnog ojačanja za one dijelove koji su izloženi višim naprezanjima tijekom rada [9].

Na slici 7. shematski su prikazani postupci neposrednog i posrednog oblikovanja tiskanjem za proizvodnju kompozita s metalnom matricom [6].



Slika 7. Prikaz (A) neposrednog i (B) posrednog oblikovanja lijevanjem [6]

2.2.2. Mehanizmi očvršćivanja metalnih kompozita

Mehanizmi očvršćivanja metalnih kompozita mogu biti podijeljeni u dvije kategorije:

- direktni (neposredni)
- indirektni (posredni)

Direktno ojačavanje, odnosno očvršćivanje matrice u metalnim kompozitima ojačanim sitnim česticama je proizašla iz klasičnog mehanizma očvrstnuća, koji se konvencionalno koristi za objašnjavanje ponašanja vlaknima ojačanih kompozita. Tijekom opterećenja, naprezanja se prenose od duktilinije matrice, preko sučelja matrice i ojačanja, sve do uobičajeno čvršćeg ojačala. U ovom slučaju, ojačanje preuzima najveći dio nametnutog opterećenja [15].

Kod česticama ojačanih kompozita s metalnom matricom, zbog niskog omjera širine i visine čestica, ovakav način prijenosa opterećenja nije učinkovit kao u slučaju ojačanja kontinuiranim vlaknima, ali i dalje može pružiti određeni dio ojačanja. U kompozitima s metalnom matricom, u kojima je primijenjeno ojačanje u obliku keramičkih ili sličnih čestica, do izražaja dolazi visoka razlika u koeficijentima toplinskog širenja. Metalna matrica obično u tom slučaju ima visok koeficijent toplinskog širenja dok ojačalo može i često ima znatno niži taj koeficijent. To može uzrokovati pukotine uslijed hlađenja materijala, jer se tada mogu formirati dislokacije na samom spoju (sučelju) matrice s ojačalom. Na ovaj način, toplinski inducirane dislokacije mogu posredno (indirektno) očvrstnuti matricu [16]. Nadalje, ako se za matricu koriste legure koje se mogu umjetno (precipitacijski) dozrijevati, toplinski inducirane dislokacije mogu poslužiti kao heterogena mjesta za nukleaciju precipitata tijekom postupka dozrijevanja. Točan doprinos indirektnog očvršćavanja nije moguće kvantificirati lako kao doprinos direktnog očvršćavanja [17].

2.2.2.1. Ojačavanje metalnih kompozita česticama

U usporedbi s monolitnim materijalima mikrostruktura i veza između konstituenata unutar kompozita s metalnom matricom su usko povezani, te se ne mogu zasebno razmatrati. Kemijska međudjelovanja i reakcije između matrice i ojačanja određuju adheziju (jakost) veze, modificiraju karakteristike kompozitnih konstituenata, te značajno utječu na mehanička svojstva konačnog kompozita.

U primjeni kompozita s metalnom matricom pri visokim temperaturama, mikrostruktura mora ostati stabilna kroz dovoljno dugo vrijeme uporabe. Toplinska stabilnost i lom uslijed primjene pri visokim temperaturama su povezane s promjenama u mikrostrukтури, ali i vezama

među konstituentima. Toplinski šok kod kompozita s metalnom matricom se može odvijati istodobno izotermno i ciklično. Tijekom cikličkog toplinskog zagrijavanja monolitnih materijala, posebice pri naglim temperaturnim promjenama, vjerojatnost loma je vrlo visoka, dok aluminijska legura ojačana česticama ili kratkim vlaknima ima dobru otpornost na toplinski šok [6].

Stvaranje dobre veze između matrice i ojačala, dakle, ima značajni utjecaj na proizvodne značajke i svojstva kompozita s metalnom matricom, a utjecaj čestica na svojstvo poput čvrstoće legura lakih metala ojačane s česticama može biti opisano sljedećem mikromehaničkim modelom [18]:

$$\Delta R_{m,c} = \Delta \sigma_{\alpha} + \Delta \sigma_{KG} + \Delta \sigma_{SKG} + \Delta \sigma_{KF} \quad (1)$$

gdje je:

$\Delta R_{m,c}$ – promjena vlačne čvrstoće zbog dodatka čestica, MPa

$\Delta \sigma_{\alpha}$ – promjena granice razvlačenja zbog geometrijskih dislokacija, MPa

$\Delta \sigma_{KG}$ – promjena granice razvlačenja zbog promjene u veličini zrna, MPa

$\Delta \sigma_{SKG}$ – promjena granice razvlačenja zbog relaksacijskih procesa, MPa

$\Delta \sigma_{KF}$ – promjena granice razvlačenja zbog očvrnuća tijekom naprezanja, MPa

Iz (1) se vidi da promjena vlačne čvrstoće zbog dodatka čestica $\Delta R_{m,c}$ ovisi o utjecaju nekoliko faktora, a među njima je i utjecaj induciranih dislokacija $\Delta \sigma_{\alpha}$ koji se može odrediti:

$$\Delta \sigma_{\alpha} = \alpha \cdot G \cdot b \cdot \rho^{1/2} \quad (2)$$

gdje je:

α – konstanta s vrijednostima 0,5 do 1

G – smični modul, GPa

b – Burgerov vektor,

ρ – gustoća dislokacija.

Gustoća dislokacija se računa prema:

$$\rho = 12\Delta T \frac{\Delta C \Phi_p}{bd} \quad (3)$$

gdje je:

ΔT – promjena temperature, K

ΔC – razlika u koeficijentu toplinskog širenja između matrice i ojačala, 1/K

Φ_p – obujam čestice, mm³

d – veličina čestice, mm.

Nadalje, promjena vlačne čvrstoće zbog dodatka čestica $\Delta R_{m,c}$ ovisi i o utjecaju veličine zrna $\Delta\sigma_{KG}$ koji je iznosi:

$$\Delta\sigma_{KG} = k_{Y1} \cdot D^{-1/2} \quad (4)$$

$$D = d \left(\frac{1-\Phi_p}{\Phi_p} \right)^{1/3} \quad (5)$$

gdje je:

k_{Y1} – konstanta,

D – rezultirajuća veličina čestice.

Utjecaj veličina zrna koja su manja od zrna ojačala, može se dobiti preko:

$$\Delta\sigma_{SG} = k_{Y2} \cdot D_s^{-1/2} \quad (6)$$

$$D_s = d \left(\frac{\pi d^2}{6\Phi_p} \right)^{1/2} \quad (7)$$

gdje je:

k_{Y2} – konstanta (tipične vrijednosti 0,05 MN m^{-3/2}),

D_s – veličina čestica manjih od čestica ojačavala,

Naposljetku, posljednji utjecajni faktor je očvrnuće uslijed naprezanja koji se može izračunati preko:

$$\Delta\sigma_{KF} = KG\Phi_p \left(\frac{2b}{d} \right)^{1/2} \cdot \varepsilon^{1/2} \quad (8)$$

gdje je:

K – konstanta,

ε – produljenje.

Ovisno o tome koji je dominantan efekt, veličina zrna čestice ojačala ili njihov udio, različito će utjecati, odnosno doprinositi rezultatu konvencionalne granice tečenja $R_{p0,2}$ za kompozite s metalnom matricom ojačane česticama. Općenito, veći je doprinos manjih dimenzija čestica za svojstva tvrdoće i udarne žilavosti [19].

Naposljetku treba napomenuti kako s dodatkom čestica lakim metalnim legurama poput aluminijske, tvrdoća, modul elastičnosti, granica razvlačenja i otpornost na trošenje rastu, dok koeficijent toplinskog širenja se smanjuje. Red veličine poboljšanja navedenih svojstava ovisi o udjelu čestica i odabranom postupku proizvodnje. Prilikom proizvodnog postupka lijevanja miješanjem, gornja granica za dodavanje čestica je oko 20 % volumnog udjela. Navedena granica je tehnički opravdana čim je najveća postignuta vlačna čvrstoća preko 500 MPa i modul elastičnosti od oko 100 GPa [9].

Moguće je proizvesti metalne kompozite ojačane s većim udjelom čestica od 20 % volumnog udjela, ali samo infiltracijskim metodama proizvodnje. Međutim, pri tim udjelima materijali poprime svojstva nalik onima keramičkih materijala, te postaju krhki, te prilikom statičkog vlačnog pokusa javlja se krhki lom, bez plastične deformacije. Bez obzira na to, niska toplinska širljivost je izvanredna, unatoč tome što ovi materijali imaju izražen metalni karakter ponašanja [20].

3. SPORTSKE JEDRILICE

Zahvaljujući tehnološkom napretku, jedrenje nije više jedini način za pogon plovila, jer se danas uvelike koristi mehanički pogon, zbog svoje snage i autonomije u odnosu na prirodne prilike, te velike fleksibilnosti. Jedrenje je umijeće upravljanja jedrilicom, tj. plovilom na vodi pokretanog isključivo snagom vjetra. U počecima ljudske evolucije, korišteno kao osnovna vještina potrebna za upravljanje ratnim, trgovačkim i turističkim brodovima, s pojavom parnog stroja te kasnije drugih vrsta motora gubi gospodarsku važnost. Danas je jedrenje za većinu ljudi rekreacija i zabava, te vrlo popularan i raširen sport [21].

Sportsko jedrenje je znači, natjecanje u kojem se koriste razne sportske jedrilice i to na morskim ili unutrašnjim vodenim površinama, isključivo pomoću porivne snage vjetra. Prvo društvo sportskog jedrenja osnovano je u Corcaighu (Corku) na jugoistoku Irske 1720. godine pod imenom Water Club of Cork Harbour. Tek kasnije oko 1815. su spojene riječi, iz Engleskog, yacht (koja pak dolazi iz holandskog *jaght*, kako su se još u 16. stoljeću nazivali mali, brzi jedrenjaci za hvatanje krijumčara i pirata) i club (s eng. društvo) u danas poznati naziv Yacht Club, kada se osnovao Yacht Club u Cowesu, na otoku Wight u Ujedinjenom Kraljevstvu.

Svrha klubova u počecima njihovog postojanja nije bila prvenstveno organizacija i održavanje jedriličarskih regata, nego su tada samo organizirali izložbe brodova. U to vrijeme, brzina jedrilica se nije toliko cijenila koliko mornarska vještina i besprijeckorno održavanje broda i njegove opreme, što se pokazivalo na paradama. Prva regata o kojoj postoji zapis je održana 1749. godine između Greenwicha i Nore na rijeci Temzi u Engleskoj. Pobjedila je jahta „Princess Augusta“ i osvojila srebrni pehar, kojeg je vlasnik jedrilice velikodušno podijelio članovima posade u obliku novčane protuvrijednosti dobivenog pehara. Međutim, kao službeni početak organiziranih regatnih natjecanja uzima se godina 1775. kad je u Engleskoj osnovano društvo Cumberlan Fleet [22].

Natjecanje sportskih jedrilica, se naziva regata, a sastoji se od serijskog natjecanja u kojem natjecatelji moraju proći prethodno određenu trasu sa svojim jedrilicama. Naziv dolazi iz talijanskog regattare koji u prijevodu znači „natjecati se“ [23]. Obično se nazivom regata opisuje događaj koji se može odnositi na natjecanje sportskih jedrilica ili na natjecanje veslačkih skupina ili sličnih pomorskih natjecateljskih skupina. Jedriličarsko natjecanje se

održava, obično za pojedinu klasu ili model broda, te obično traje više dana. Mogu ih sazivati jedriličarski klubovi, savezi, gradovi ili pak škole koje se bave tom tematikom. Najveća i

najpoznatija jedriličarska regata u svijetu se naziva „Cowes Week“ koju održava jednom godišnje Kraljevska jedriličarska brigada u Cowesu, u Engleskoj i obično svake godine privuče i do 900 jedrilica [24].

3.1. Razvoj jedra i jarbola

Razvoj jarbola, neposredna je posljedica razvoja jedara, te jedno bez drugoga ne mogu funkcionirati, stoga je potrebno njihov razvoj sagledati u određenoj mjeri, istovremeno. Začeci jedrenja, vjeruje se da leže u dubokoj želji čovjeka za istraživanjem ili neki stručnjaci napominju, u želji za preživljavanjem. Dakako, nije isključeno da su oba spomenuta čimbenika, te možda i neki drugi zaslužni za čovjekovo otisnuće na vodene površine.

Podrijetlo samog jedra je poprilično tajnovito, međutim vjeruje se da je priobalni, primitivni čovjek, koristio životinjsku kožu kako bi pogonio svoje splavi ili primitivne kanue snagom vjetra. Sljedeći vjerojatan korak je bila uporaba tekstilnog ili pletenog materijala koji bi rasprostrli između dva stupa ili štapa. Jedro kao pogonsko sredstvo većih čamaca i brodova ovisilo je o veličini i prilikama mora. Povjesničari su došli do zanimljivih otkrića na području razvoja plovila s jedrom. Pa tako se spominje da su oko 4000 godina prije Krista, Egipćani imali poprečna križna jedra izrađena od papirusa, dok su Feničani opremali svoje brodove sa čak dvama jarbolima i lanenim križnim jedrima. Nadalje, oko 3000. do 900. godine prije Krista jedra u obliku kvadrata su bila naveliko zastupljena, da bi tek 1000 godina kasnije bilo široko poznato postojanje jedrenja u svrhe trgovine, sa čitavim flotama i trgovinskim mrežama koje su se prostirale preko Sredozemlja. Potom oko 500 godina prije Krista se pojavljivalo brodovlje sa dva velika jarbola koje je utkalo put k poznatim jedrenjacima. Daljnjem razvoju je uvelike pridonijelo Rimsko Carstvo s jednim od najvećih brodova svoga vremena od koji su se neki protezali preko 50 metara, te su neki imali mogućnost istodobne uporabe jedara i vesala, slično kao što je prikazano na slici 8. [21].



Slika 8. Prikaz modela Rimske galije [25]

Naposljetku, koliko god bila različita jedra i njihova postava na brodogradnji antičkoga ili današnjeg svijeta, sva su imala nešto zajedničko, a to je bio jarbol, bez kojega jedra ne bi imala na čemu stajati i bez njega ne bi mogle prenositi silu vjetra na brodicu pogoneći ju tako preko morskih prostranstava. Jarbol kao dio brodske opreme na sportskim jedrilicama, može se smatrati jednako važnim kao i sam trup plovila, pošto se bez njega ne može niti zamisliti pokretanje takvog broda.

Kao što je već spomenuto, kako se razvijalo jedro, tako se istodobno razvijao i jarbol, i to oblikom i sposobnošću nošenja. U počecima su bili oblikovani kao kratki debeli jarboli, izrađivani najčešće od obrađenog debla nekog stabla. Kasnije kako je razvoj napredovao, deblo stabla je zamijenjeno sa lijepljenim i sastavljenim, te profiliranim jarbolom, međutim još uvijek od drveta. U jednom periodu razvoja jarbola, izrađivao se čak i od čeličnih materijala, međutim svi materijali koji su tada upotrebljavani nisu pokazivali takva svojstva kao što su pokazivali jarboli načinjeni od aluminijskih legura ili jarboli načinjeni od kompozitnih polimera ojačanih ugljičnim vlaknima [26].

3.1.1. Materijali za izradu jarbola

Jarbol je s konstrukcijskog gledišta uklješteni štap ili greda, opterećen najčešće na savijanje i izvijanje. Zbog jačine vjetra, te potrebe za napinjanjem jarbola, naprezanja u njemu

su relativno velika, pa s time su povezana i puknuća na kritičnim presjecima, odnosno velike plastične deformacije. S time na umu, ljudi su došli do raznih rješenja konstrukcije jarbola, a pritom su se držali odrednica kakva svojstva jarbol treba posjedovati:

- niska cijena,
- dovoljna elastičnost i istodobno krutost,
- otpornost na atmosferilije i starenje materijala,
- gustoća (poželjno što je manja moguća),
- otpor na umor materijala (uslijed dinamičkog opterećenja) [27].

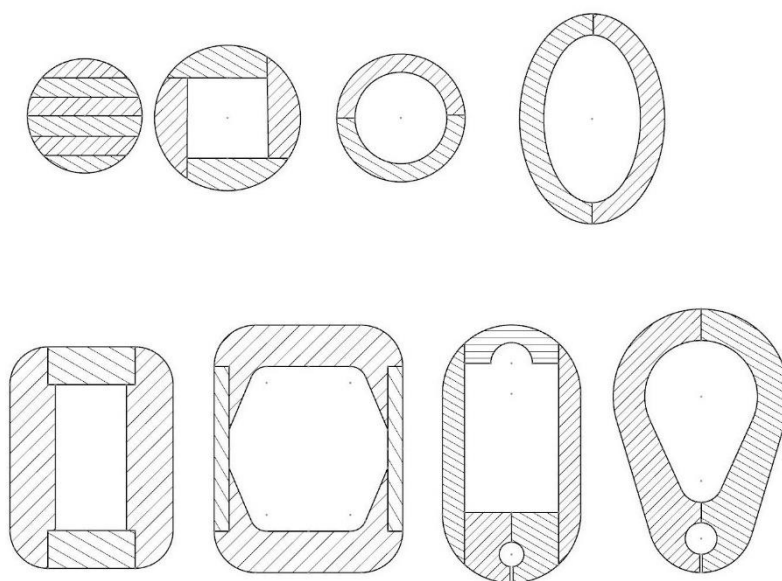
Od početka razvoja jarbola pa do danas, stručnjaci se slažu kako je uglavnom razvoj tekao kroz tri glavna stupnja. U početku se koristilo drvo, potom su se koristili metali i to uglavnom laki metali. Čelik, se kratko koristio u konstrukciji jarbola, a danas se u potpunosti izbjegava, zbog toga što u usporedbi s aluminijskim materijalima ima puno lošija svojstva. Naposljetku, današnje sportske jedrilice, nerijetko imaju jarbole načinjene od polimernih kompozita ojačanih ugljičnim vlaknima.

Drveni jarboli

Drvo je najčešće korišteni materijal za izradu jarbola, od samog početka proizvodnje jarbola. Ono, vrlo često, raste u prirodnom obliku jarbola, a konstruktorima plovila s početka 20. stoljeća, na prvi je pogled bilo idealnih svojstava:

- niske gustoće,
- elastično,
- lako obradivo,
- jeftino.

Uglavnom jarboli od drveta su se izrađivali od laganog, ali istodobno žilavog drva, najčešće od različitih vrsta smrekovine i jelovine, a zatim od borovine i ariša. Danas se lijepe sa sintetskim ljepilima (fenolnim, rezorcinskim, epoksidnim). Slika 9. prikazuje neke različite presjeke drvenih jarbola, kakvi su se koristili i izrađivali početkom 20. stoljeća.



Slika 9. Različiti presjeci drvenih jarbola

Međutim, drveni jarbol ima neke važne nedostatke koji su na kraju uzrokovali da se drvo kao građevni materijal jarbola istisne iz uporabe:

- U usporedbi s modernim materijalima, posjeduje relativno visoku gustoću,
- Najveća čvrstoća je prisutna uporabom samo jednog komada drva, što nije praktično, a često niti moguće,
- Ukoliko se pravilno ne održava i ne tretira, sklono je starenju i truljenju [27].

Zbog prisutnih naprezanja, upravo činjenica da se samo iz jednog, cjelovitog, komada mogu dobiti najbolja svojstva je bila vrlo važna početkom 20. stoljeća, posebice u Britaniji. Naime, tijekom industrijske revolucije, velika područja šuma su bila uništena, što je stvorilo manjak cjelovitih komada drvenih materijala. Drvena sirovina potrebna za izradu takvih jarbola, je postajala sve teže nabavljiva, a time istodobno i skuplja. Takvi jarboli su bili u uporabi tisuće godina, i više puta pokazali da su pouzdano sredstvo za nošenje jedra. Stvari su se promijenile tek u drugoj polovici 20. stoljeća, pošto se osnovna namjena jedrilice promijenila. Lake jedrilice sve više se proizvodile za brzinu i utrke. Danas, troškovi rada i proizvodnje drvenih jarbola, u odnosu na dobivena svojstva, pokazuju da takvi jarboli više nisu isplativi [28]. U suvremenoj primjeni, ako se pak negdje i koriste drveni jarboli, uglavnom se

tada radi o replikama, muzejskim eksponatima, te najviše radi estetike, nego iz tehničkih razloga.

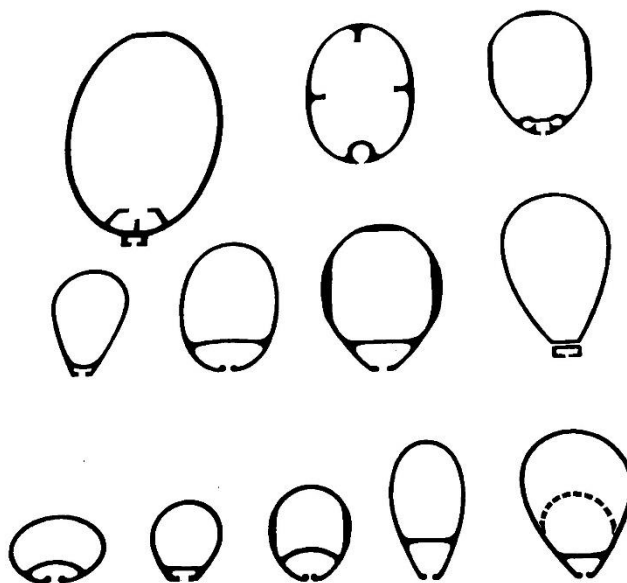
Aluminijski jarboli

Danas su gotovo posve zamijenili drvene jarbole. Približno imaju upola manju gustoću od drvenih, a pri tom su 3 do 4 puta čvršći. Zbog toga mogu biti manjeg promjera, te imaju jednostavniju oputu (jednostavnije postavljenu užad i konope). Manji promjer, tanja stjenka, te manja ukupna masa uzrokuju manje nagnjanje jedrilice i manje momente inercije jarbola kad je jedrilica na vrhu vala. Dakako, prisutno je manje savijanje jarbola i manji otpor zraka. Masa je homogeno raspoređena uzduž jarbola, a dodatna prednost je što aluminij je u potpunosti otporan na atmosferilije, što ga čini jeftinijim za održavanje.

Aluminijski jarbol za primjenu u čamcima i sličnim plovilima su prvi puta korišteni nakon Prvog svjetskog rata. Tada je postojala relativno jeftina ponuda aluminijskih folija, načinjenih od pregrada za zrakoplovnu industriju. Otada pa sve do danas, ovakvi jarboli predstavljaju najčešći izbor materijala za krstaše i široki broj natjecateljskih klasa [27].

Kada su u počecima aluminijski jarboli ulazili u primjenu, oko 1930-ih godina su se izrađivali od deformiranog aluminijskog lima namijenjen zrakoplovnoj industriji, koji bi onda po postizanju željenog oblika bio pričvršćen zakovicama. Današnja proizvodnja se uglavnom temelji na uporabi tehnologije ekstrudiranja, te se pozornost daje legurama sa povećanom otpornosti na morsku vodu. Presjeci mogu biti različitih geometrija, veličina, a izabiru se prema duljini jarbola i veličini plovila [27].

Na slici 10. su prikazani neki uobičajeni ekstrudirani oblici presjeka aluminijskih jarbola.



Slika 10. Različiti presjeci aluminijskih jarbola [27]

Veličina jarbola koji bi se trebao izraditi za pojedino plovilo, utječe i na način proizvodnje. Za jednostavne jarbole manjih plovila, recimo kružnog presjeka, standardno se ekstrudiraju i režu na potrebnu duljinu. Ovo predstavlja najjeftiniji, najbrži i najpopularniji oblik proizvodnje, unatoč tome što se vrlo malo promijenio od 1970. godina prošlog stoljeća. Međutim, ukoliko se traži bolja učinkovitost i veći jarbol, može se upotrijebiti isti sustav ekstrudiranja sa jednom suptilnom promjenom. Osim uporabe drugačijih legura, koje omogućuju jarbolu bolje savijanje, također postoji i dodatna obrada. Naime, kod velikih jarbola, nakon ekstruzije, s vrha se izrezuje trokutasti oblik, te se krajevi zavaruju. Takav postupak izmjene geometrije oblika presjeka na dijelu vrha jarbola, mu omogućuje dodatno savijanje.

Najnovija tehnologija izrade aluminijskih jarbola, najčešće koristi materijal AlustarTM koji je posebno proizveden za primjenu u nautici. U industriji još nosi oznaku 5052-O, odnosno prema ISO-u AlMg2,5. Svojstva koja pruža su oko 20% veća vlačna čvrstoća u odnosu na ostale legure, što omogućuje tanju debljinu stijenke, a to u konačnici smanjuje ukupnu masu jarbola. Zadržava visoku otpornost na koroziju, otpornost na savojno opterećenje, te relativno visoku zavarljivost. Legura AlMg2,5 može se izraditi valjanjem u ploče, s kojima se onda zavaruju razni oblici složenih jarbolskih konstrukcija [27]. Tablica 1. prikazuje neke karakteristike ove legure aluminija.

Tablica 1. Mehanička svojstva AlMg2,5 legure [28]

| Mehaničko Svojstvo | Iznos |
|-----------------------|----------|
| Tvrdoća (Brinell) | 47 |
| Vlačna čvrstoća | 193 MPa |
| Modul elastičnosti | 70,3 GPa |
| Poissonov koeficijent | 0,33 |
| Modul smika | 25,9 GPa |
| Smična čvrstoća | 124 MPa |

Kompozitni jarboli

Sve do početka razvoja ugljičnih vlakana, smatralo se nemogućim naći materijal koji bi mogao naditi svojstva koje pružaju aluminijske legure. Jarboli od polimera ojačanih s ugljičnim vlaknima su se prvi puta uporabili u ranim 90-im godinama prošloga stoljeća na Američkom kupu, poznatom regatnom natjecanju. Međutim, objašnjenje za dominaciju aluminija i danas, leži uglavnom u cijeni. Naime, jarboli od polimera ojačanih ugljičnim vlaknima, su još uvijek relativno skupi te se uglavnom koriste samo na najskupljim plovilima i predstavljaju najviši stupanj tehnološkog razvoja [28]. Primjer takvog plovila su najčešće katamarani, a jedan od najpoznatijih je AC45, koji ima kruto jedro s jarbolom načinjene od polimera ojačanog ugljičnim vlaknima prikazanog na slici 11.



Slika 11. Katamaran sa krutim jedrom i jarbolom od ugljičnih vlakana [29]

Očito, uporabom ovakvog materijala, se značajno poboljšavaju karakteristike plovila, a postoje dvije glavne metode proizvodnje. Prva uključuje uporabu standardnih kalupa, kako bi se proizveo jednolik presjek cijelom duljinom jarbola. Ovo je ujedno i najjeftinija metoda za izradu, jer kalupi se mogu upotrebljavati višekratno. Druga metoda je izrada dijelova koji su specifični za određeno plovilo, znači jedinstveni, pri čemu se kalupi moraju konstruirati. Takva metoda je skuplja jer se kalup proizvodi za samo jednu vrstu, te se uglavnom može upotrijebiti samo jedan puta.

Jarboli se inače uz uporabu ovih kompozita mogu vrlo precizno izraditi, naročito uz uporabu računalne tehnologije. Kako bi se za pojedini jarbol točno mogle odrediti zone opterećenja, koristi se tehnologija CFD, što je skraćenica engleskog naziva Computational Fluid Dynamics, odnosno u prijevodu „Računalom podržana dinamika tekućina“. Orijehtacijom vlakana se dolazi do jarbola koji ima optimalna svojstva u pogledu savijanja, te ako se upari sa jedrom proizvedenim jednako visokom tehnologijom, čine mnogostruko nadmoćniji sustav od onoga sa aluminijskim jarbolima i poliesterskim jedriljem.

Provedena su razna istraživanja sa materijalima koji smiju biti korišteni za izradu jahti za natjecanje na Američkom kupu, među kojima je provedeno i istraživanje na polimerima ojačanim ugljičnim vlaknima, te su pokazala jedan zabrinjavajući nedostatak. Ukoliko dođe do katastrofalnog loma (krhkog loma) jarbola, odnosno dijela opreme, stvaraju se sitne čestice, poput iverja, koji mogu djelovati poput šrapnela i nanijeti ozbiljne ozljede posadi.

Naposljetku, glavni čimbenik koji podiže ukupne troškove izrade ovakvih jarbola je uglavnom količina rada i energije koju je potrebno uložiti. Tipičan jarbol od ugljičnih vlakana je oko 7 puta skuplji od onoga od aluminija [28]. Stoga je jasno zašto je uporaba ograničena samo u područjima koja jedina imaju potencijala opravdati uloženo.

4. EKSPERIMENTALNI DIO

4.1. Metode ispitivanja i analize

Korišteno je nekoliko metoda ispitivanja i analize uzoraka, a provedene su u Laboratoriju za materijalografiju, Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava i Laboratoriju za analizu metala Zavoda za materijale pri Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu.

Izrada kompozita s metalnom matricom je izvedena u Institutu za istraživanje materijala pri Slovačkoj akademiji znanosti u Bratislavi.

4.1.1. Ispitivanje mehaničkih svojstava statičkim vlačnim pokusom

Statički vlačni pokus služi ispitivanju elastičnog i plastičnog ponašanja materijala u uvjetima jednoosnog statičkog vlačnog naprezanja. Uslijed djelovanja sile F u svim točkama poprečnog presjeka štapa (ploštine S_0) nastaju vlačna naprezanja, σ (N/mm²):

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

Djelovanje normalnih vlačnih naprezanja σ izaziva produljenje štapa ΔL , odnosno relativno produljenje ε ,

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

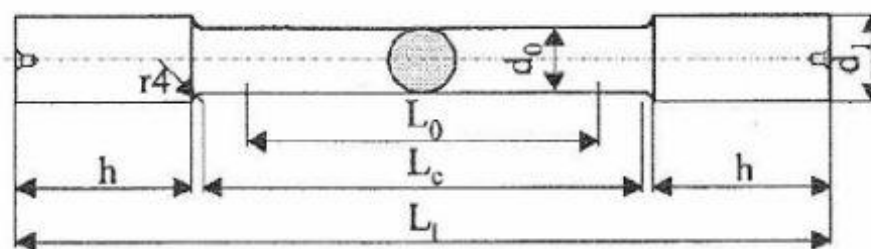
Kod elastične deformacije iznos normalnog naprezanja na poprečnom presjeku štapa ovisi o relativnom produljenju ε i fizikalno-mehaničkim svojstvima materijala prema Hooke-ovom zakonu:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

gdje je:

E – modul elastičnosti, N/mm²

Izgled i mjere najčešće ispitne epruvete za statički vlačni pokus prikazani su na slici 12.



Slika 12. Prikaz uobičajene epruvete za statički vlačni pokus prema normi DIN 50 115; L_0 - početna mjerna duljina, d_0 - početni promjer, S_0 - ploština početnog presjeka [30]

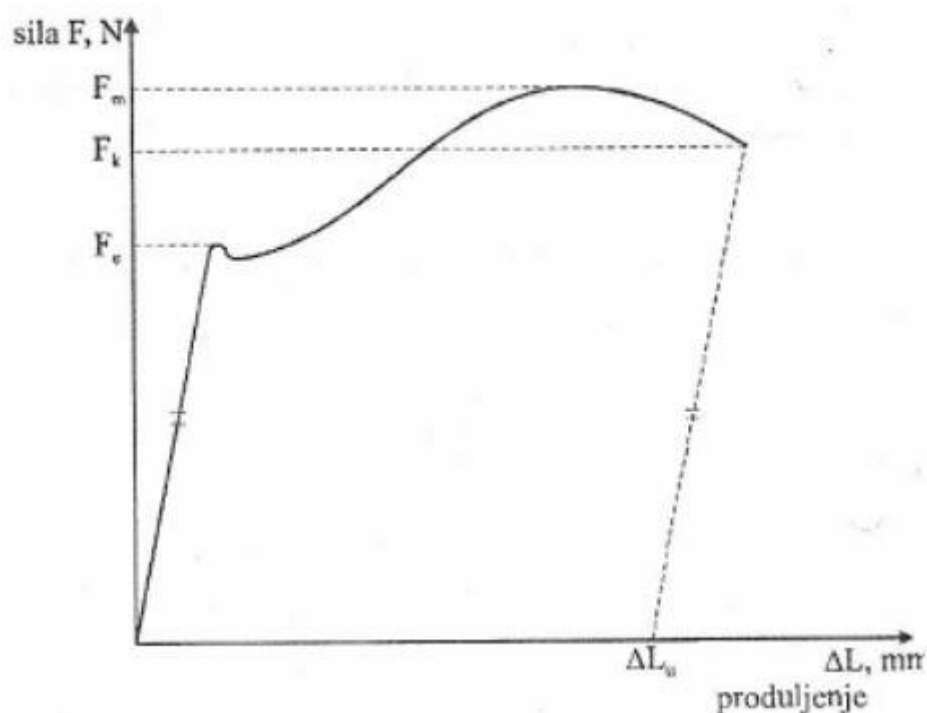
Uobičajeno se za ovaj pokus izrađuju dugačke epruvete, kod kojih je:

$$L_0 = 11,3 \cdot \sqrt{S_0}$$

U slučaju nedovoljne količine materijala izrađuju se kratke epruvete kod kojih je:

$$L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0}$$

Tijekom statičkog vlačnog pokusa na kidalici se snima dijagram promjene sile i produljenja epruvete koji je prikazan na slici 13.



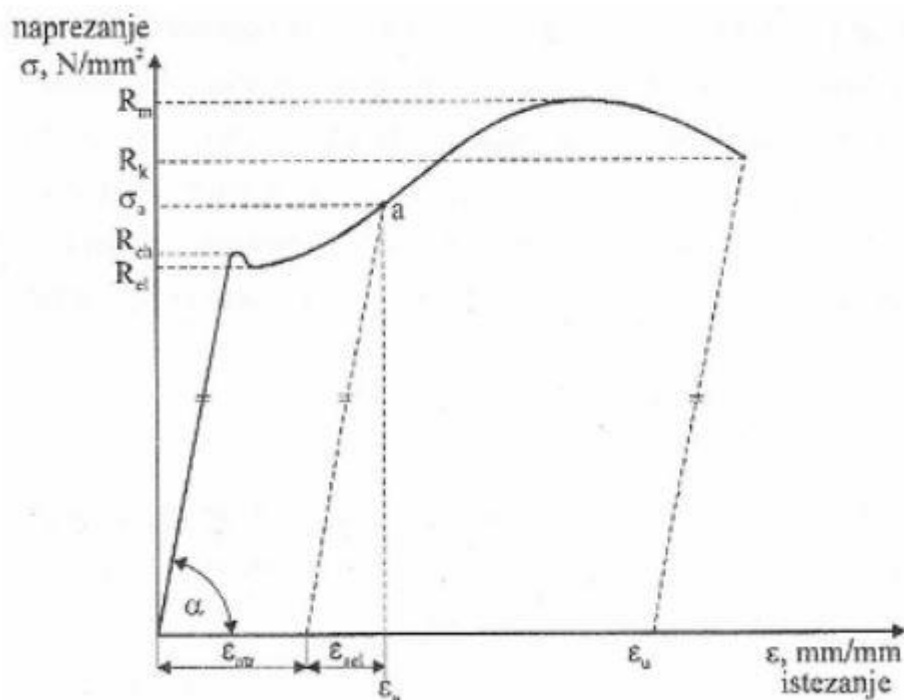
Slika 13. Dijagram promjene sile F na kidalici i produljenja epruvete ΔL (meki čelik)

Pri tome se epruveta isteže uz prirast naprezanja manji od 10 N/mm^2 u sekundi. Iz dijagrama sila-produljenje primjenom jednadžbi:

$$\Delta L = L - L_0 \quad - \text{ za produljenje}$$

$$\Delta L_u = L_u - L_0 \quad - \text{ za ukupno produljenje,}$$

konstruira se dijagram naprezanje-istezanje, sličan onome prikazanom na slici 14.



Slika 14. Dijagram promjene naprezanja ispitne epruvete u ovisnosti o produljenju [30]

Dijagram naprezanje-deformacija kvalitativno je sličan dijagramu sila-produljenje. Prvi dio dijagrama naprezanje – deformacija pokazuje linearno ponašanje materijala prema Hookeovom pravcu. Ako bi se u ovom području naprezanja epruveta rasteretila, vratila bi se na polazne mjere, jer je u materijalu prisutna samo elastična deformacija.. Nakon što naprezanje u materijalu dostigne vrijednost R_e - iznos granice razvlačenja, on se počinje plastično deformirati ("teći") bez dodatnog povećanja naprezanja granica razvlačenja je jednaka:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}$$

Daljnje produljenje epruvete događa se uz nerazmjerno malo povećanje naprezanja za iznos nastale deformacije, tj. materijal je ušao u područje elasto-plastičnih ili (trajnih) plastičnih

deformacija. Naprezanje u materijalu kod najveće sile (F_m) naziva se vlačnom ili rasteznom čvrstoćom R_m i jednako je:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

Naprezanje R_m nije i u stvarnosti maksimalno naprezanje u materijalu, jer se pri njegovom određivanju ne uzima u obzir smanjenje površine presjeka epruvete, već se sva naprezanja računaju s početnom ploštinom presjeka S_0 . Nakon što materijal dostigne vrijednost R_m na određenom mjestu epruvete pojavljuje se suženje, tzv. vrat epruvete. Naprezanje kod kojeg epruveta puca naziva se konačnim naprezanjem R_k i jednako je:

$$R_k = \frac{F_k}{S_0}$$

Nakon kidanja epruvete određuje se njeno ukupno istezanje ε_u :

$$\varepsilon_u = \frac{L_u - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L_u}{L_0}$$

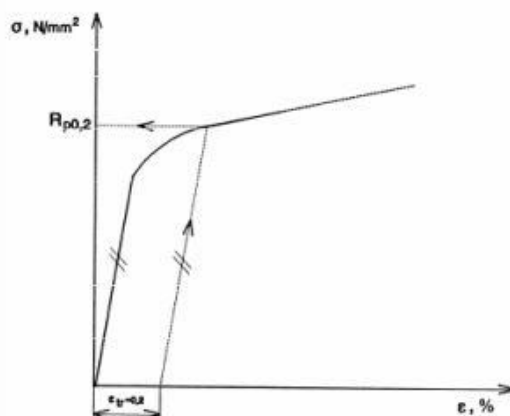
Ako se vrijednost istezanja nakon kidanja izrazi u postotcima dobiva se istezljivost, A :

$$A = \varepsilon \cdot 100\%$$

Kao dodatna veličina nakon kidanja epruvete određuje se suženje poprečnog presjeka (kontrakcija), Z :

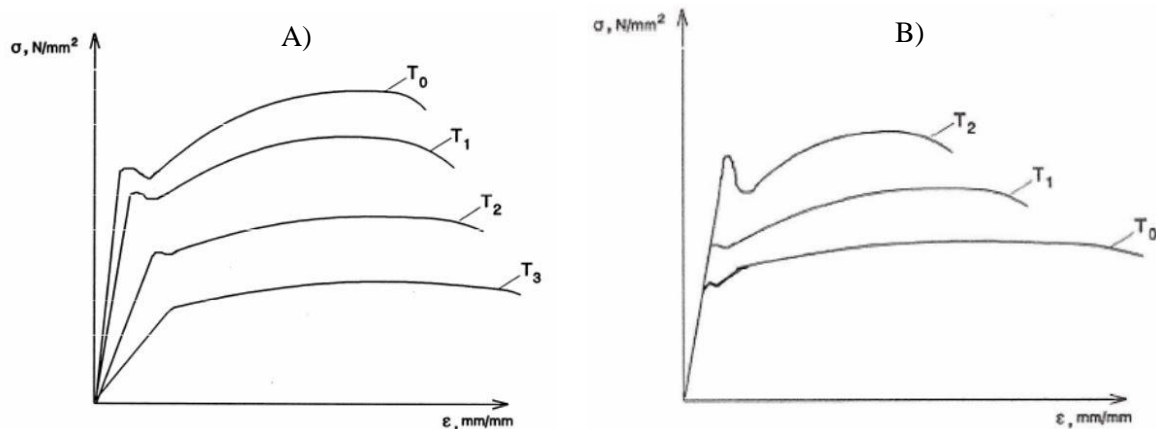
$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100\%$$

Kod materijala s neizraženim prijelazom iz elastičnog u elasto-plastično područje deformacije određuje se konvencionalna granica razvlačenja kao ono naprezanje koje izaziva trajnu (plastičnu) deformaciju od 0,2 % [30]. Slika 15. prikazuje dijagram naprezanje - istezanje za materijale s neizraženim prijelazom iz elastičnog u plastično područje.



Slika 15. Dijagram naprezanje σ - istezanje ε za materijale s neizraženim prijelazom iz elastičnog u plastično područje – određivanje konvencionalne granice razvlačenja $R_{p0,2}$ [30]

Na izgled i vrijednosti očitane iz dijagrama σ - ε značajno utječe temperatura. S povišenjem temperature krivulje naprezanje-deformacija se potiskuju prema dolje. Pri sniženju temperature, u odnosu na sobnu temperaturu, materijal pokazuje sve veću granicu razvlačenja, ali puca uz manje iznose ukupnog istezanja. Opisani slučajevi su opisani na slici 16.



Slika 16. Prikaz na slici (A) prikazuje utjecaj povišenja temperature na σ - ε dijagram ($T_3 > T_2 > T_1 > T_0$), a (B) utjecaj sniženja temperature na σ - ε dijagram ($T_2 < T_1 < T_0$)

4.1.2. Metalografska analiza

Metalografija se bavi istraživanjem strukture metala i legura pomoću svjetlosnog (metalografskog) i elektronskog mikroskopa. Makrostruktura je vidljiva golim okom ili uz malo povećanje. Mikrostruktura zahtijeva pomoć mikroskopa, a povećanje treba biti barem 25 puta.

Metalografska analiza može dati sljedeće podatke o materijalu:

- veličina kristalnog zrna
- prisutne faze
- raspodjelu faza
- deformacije strukture nastale nakon plastične deformacije materijala
- debljinu i strukturu površinskih prevlaka
- određivanje pukotine i načina loma [31].

Omogućavanje vidljivosti strukture se vrši na način da površinu uzorka treba izbrusiti brusnim papirom i to redom sve finijim, te konačno najfinije polirati. U svrhu analize strukturnih faza i konstituenata mora se polirana površina jetkati (nagrizati) [31].

4.1.2.1. Postupak pripreme uzoraka za metalografsku analizu

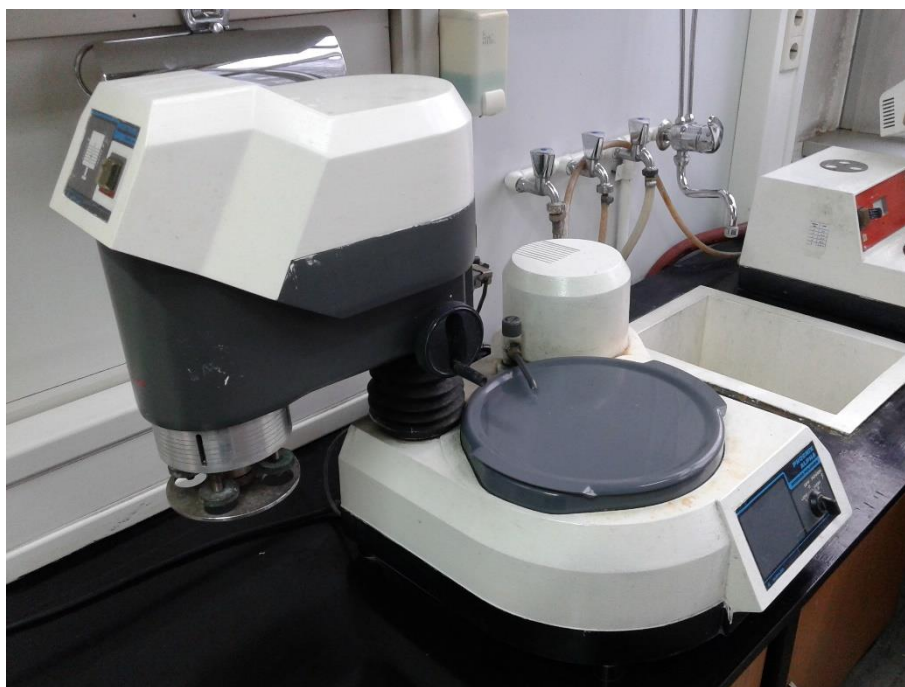
Postupak koji se koristio prilikom pripreme uzoraka, koji su najprije izrezani potom zaliveni u prozirnu masu u Laboratoriju za materijalografiju:

A) Brušenje

Koristio se brusni papir s česticama SiC, na način da se grubost mijenjala prema finijem, te su brusni papiri imali oznake: P320, P500, P1000, P2000, P4000

Parametri tijekom brušenja su bili: 300 o/min, hlađenje vodom,

Potrebno je bilo zakretati uzorak za 90° dok se ne vide risovi od prethodnog brušenja, a potom je uslijedilo ispiranje pod vodom. Na slici 17. prikazan je uređaj u Laboratoriju za materijalografiju s kojim se izvršio postupak brušenja uzoraka.



Slika 17. Uređaj na kojem je proveden postupak brušenja ispitnih uzoraka u Laboratoriju za materijalografiju

B) Poliranje

- Parametri 1. koraka:
 - 150 o/min
 - Uporaba lubrikanta
 - Disk sa tkaninom MD-MOL
 - Dijamantna pasta 3 μ m
 - Pritisak 25N
 - Trajanje: 3min

Potom je uslijedilo ispiranje i sušenje uzorka.

- Parametri 2. koraka:
 - 150 o/min
 - Uporaba lubrikanta
 - Tekućina koja zamjenjuje lubrikant i dijamantnu pastu;
 - OP-S(Proizvođač: Struers)
 - Pritisak 15N
 - Trajanje: 2,5 min

Potom je također uslijedilo ispiranje i sušenje uzorka. Na slici 18. prikazan je uređaj u Laboratoriju za metalografiju s kojim se izvršio postupak poliranja uzoraka.



Slika 18. Uređaj na kojem se provodio postupak poliranja ispitnih uzoraka u Laboratoriju za metalografiju

- 3. Korak: nagrivanje uzoraka s Keller's Reagent
 - sastav: 2,5 ml HNO_3 ; 1,5 ml HCl ; 1 ml HF ; 95 ml H_2O
 - trajanje: 10 - 20 sekundi, dva nagrivanja

Na slici 19. prikazano je posebno mjesto u laboratoriju u kojem se proveo postupak nagrivanja.



Slika 19. Nagrivanje se obavezno provodi ispod "haube" zbog mogućih štetnih isparavanja

Na kraju se provodi pregled mikrostrukture na svjetlosnom mikroskopu Olympus BX51, te čuvanje uzorka u eksikatoru, posudi koja je na dnu ispunjena sa SILICA gel kristalićima, koji upijaju vlagu i onemogućavaju koroziju uzoraka. Dok su plave boje, smatraju se u redu, a kada svi pocrvene moraju se obnoviti u peći.

4.1.3. Ispitivanje tvrdoće po Brinell-u i Vickers-u

Tvrdoća se opisno definira kao otpornost materijala prema prodiranju ili zarezivanju drugim, znatno tvrđim tijelom. Pri tome ovo tvrde tijelo može biti dijamant (kao najtvrdi prirodni materijal) ili neki drugi tvrdi materijal (kaljeni čelik, tvrdi metal).

Tvrdoća nije fizikalno egzaktno definirano svojstvo, međutim njeno ispitivanje je jednostavno, brzo, bez većeg oštećivanja površine materijala, a dobiveni rezultati su u dobroj korelaciji s nekim drugim mehaničkim svojstvima (npr. R_m). Za ispitivanje tvrdoće nisu potrebni posebno izrađeni uzorci već je ispitivanje moguće, ovisno o metodi, na poluproizvodima ili čak na gotovim proizvodima [30]. Od niza metoda ispitivanja tvrdoće u strojarstvu se ističu slijedeće dvije, nazvane prema autorima koji su ih prvi primijenili:

- metoda po Brinellu
- metoda po Vickersu

Kod Brinell-ove metode je tijelo koje se utiskuje u metal kuglica od zakaljenog čelika. Tijelo koje se utiskuje općenito se naziva penetrator ili indenter. Za ispitivanje tvrdih materijala koristi se kuglica od tvrdog metala. Po ovoj metodi se mjeri isključivo tvrdoća metalnih materijala. Nakon utiskivanja zadanom silom i vremenom nastaje otisak u obliku kalote. Između srednjeg promjera otiska, promjera kuglice i sile utiskivanja postoji ovisnost prema jednadžbi:

$$HB = \frac{F}{S} = \frac{0,204 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Gdje je:

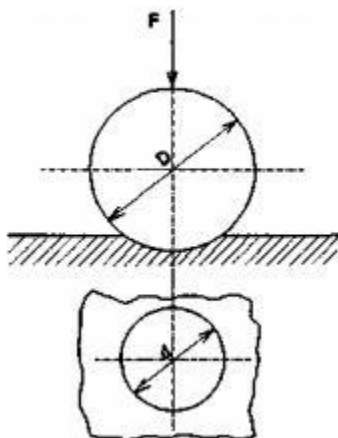
F – sila, N

S – ploština kugline kalote, mm²

D – promjer kuglice, mm

D – promjer baze kugline kalote (otiska), mm

Na slici 20. je prikazana skica provođena postupka mjerenja tvrdoće kod Brinell-ove metode.



Slika 20. Skica kuglice i otiska kod Brinell-ove metode [31]

Kod Brinell-ove metode se tvrdoća određuje na temelju veličine otiska. Promjer čelične kuglice D može biti od 1 do 10 mm (1, 2, 2.5, 5 i 10 mm), a sila kojom se opterećuje kuglica F treba biti takva da je zadovoljena slijedeća jednačba:

$$d = (0,24 - 0,6) \cdot D$$

Ako je promjer otiska (d) manji od $0,24D$ primijenjena sila F je premala, odnosno ukoliko je $d > 0,6D$ sila F je bila prevelika. Stoga je vidljivo da je rezultat ispitivanja tvrdoće prema Brinell-ovoj metodi ovisan o primijenjenoj sili i ispitivanom materijalu, tj. izbor sile F i promjera kuglice treba provesti prema tzv. stupnju opterećenja, X :

$$F = \frac{X \cdot D^2}{0,102}$$

Konstanta X je npr. Fe-C legure $X = 30$, za Cu i Cu-legure $X = 10$, za Al i Al-legure $X = 10$, za Sn i Pb $X = 1,25$ itd. Ovisnost sile utiskivanja kuglice F o promjeru kuglice D i ispitivanom materijalu, uz ograničenje metode na ispitivanje tvrdoće materijala do 450 HB (odnosno najviše 600 HB) i relativno velik otisak, glavni su nedostaci Brinell-ove metode ispitivanja tvrdoće. Primjena metode je uglavnom za ispitivanje tvrdoće mekših materijala (željeznih ljevova, nekaljenih čelika, aluminija i njegovih legura, bakra i njegovih legura itd.) u ljevaonicama i tehnološkoj kontroli kvalitete [30]. Vrijednost izmjerene tvrdoće Brinellovom metodom piše se npr. na slijedeći način:

$$HB_{10/29420/15} = 200$$

što znači da je kuglica promjera $D = 10$ mm opterećivana silom $F=29420$ N (3000 kp) u trajanju od 15 sekundi.

Ispitivanje tvrdoće metodom Vickers otklanja prethodno navedene glavne nedostatke Brinell-ove metode. Po metodi Vickers moguće je ispitivati tvrdoću svih tehničkih i prirodnih materijala, a tvrdoća nije ovisna o primijenjenoj sili. Ovo je ostvareno primjenom dijamantnog indentora posebne geometrije, u obliku istostrane četverostrane piramida s kutom između stranica od 136° . Ovakav indenter omogućuje ispitivanje tvrdoće neovisne o primijenjenoj sili, pa se tvrdoća mekih materijala i tvrdih materijala može ispitivati primjenom iste sile. Utiskivanjem ovakvog penetratora u materijalu ostaje otisak oblika piramide, kao prikazano na slici 21. Tvrdoća se određuje prema jednadžbi za HV pri čemu se mjernim mikroskopom izmjere dijagonale (d_1 , d_2) baze piramide otisnute u materijalu [30].

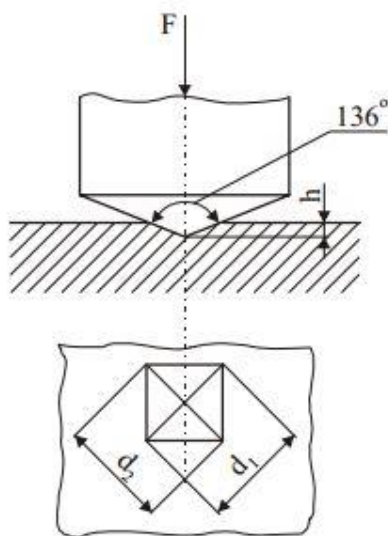
$$HV = \frac{F}{S} = \frac{F \cdot 0,189}{d^2}$$

Gdje je:

F - primijenjena sila, ($F = 49 \dots 981$ N)

S - površina šuplje piramide otisnute u materijalu, mm^2

d –srednja vrijednost dijagonala baze piramide u mm, $d=(d_1+d_2)/2$, mm



Slika 21. Shematski prikaz indentora i otiska kod ispitivanja tvrdoće po metodi Vickers [31]

Kod Vickersove metode tvrdoća se određuje na osnovi veličine otiska. Mjerno mjesto prije ispitivanja tvrdoće treba biti odgovarajuće pripremljeno (brušeno i eventualno polirano) da bi se osigurala refleksija svjetlosti za mjerenje dijagonale otiska u mjernom mikroskopu. Upotreba određene sile ovisi od debljine uzorka. Moguće je ispitivati i vrlo tanke uzorke primjenom male sile. Nadalje upotrebom male sile moguće je ispitati tvrdoću pojedinih kristalnih zrna i mikrostrukturnih faza. Vickers-ova metoda općenito je primjenjiva u laboratorijskim ispitivanjima i kontroli kvalitete tehničkih materijala i proizvoda. Vrijednosti Vickers-ove tvrdoće navode se uz simbol HV, iza kojeg slijedi indeks koji se odnosi na iznos primijenjenog opterećenja, npr. (npr. HV5 = 500, znači da je sila utiskivanja iznosila 5 kp odnosno 49 N) [30].

4.1.4. Optička emisijska spektrometrija s tinjajućim izbojem GD-OES

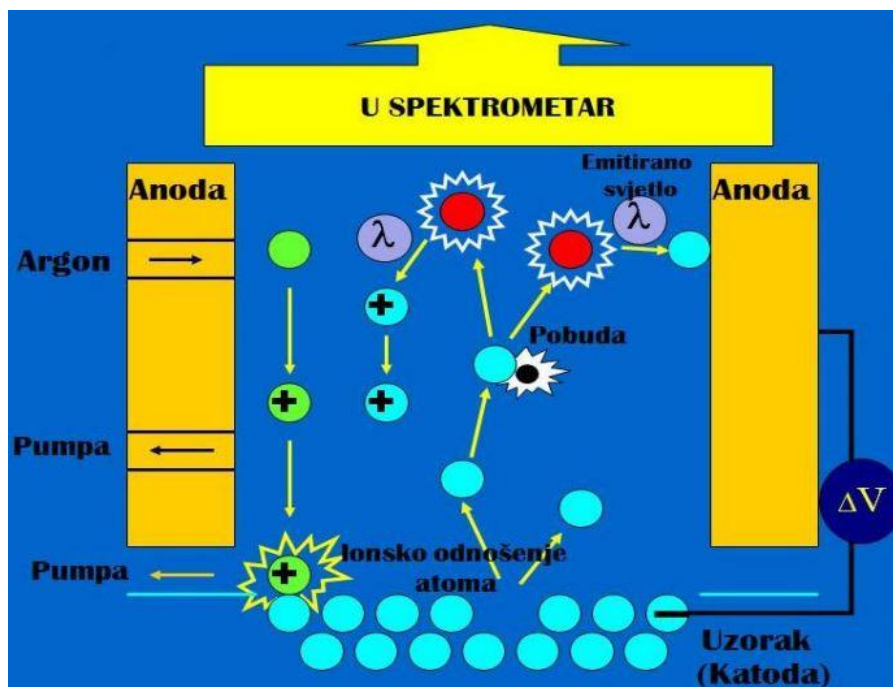
Optička emisijska spektrometrija s tinjajućim izbojem (GD-OES - *Glow Discharge Optical Emission Spectrometry*) primjenjuje se za određivanje kemijskog sastava osnovnog materijala, kemijskog sastava prevlake, debljine prevlaka, a isto tako služi i za kvantitativnu dubinsku profilnu analizu (QDP) slojeva na površini osnovnog materijala tj. za utvrđivanje sastava sloja te rasporeda pojedinih elemenata od površine prema unutrašnjosti ispitnog uzorka [32].

Na slici 22. prikazan je uređaj GDS 850A, Leco.



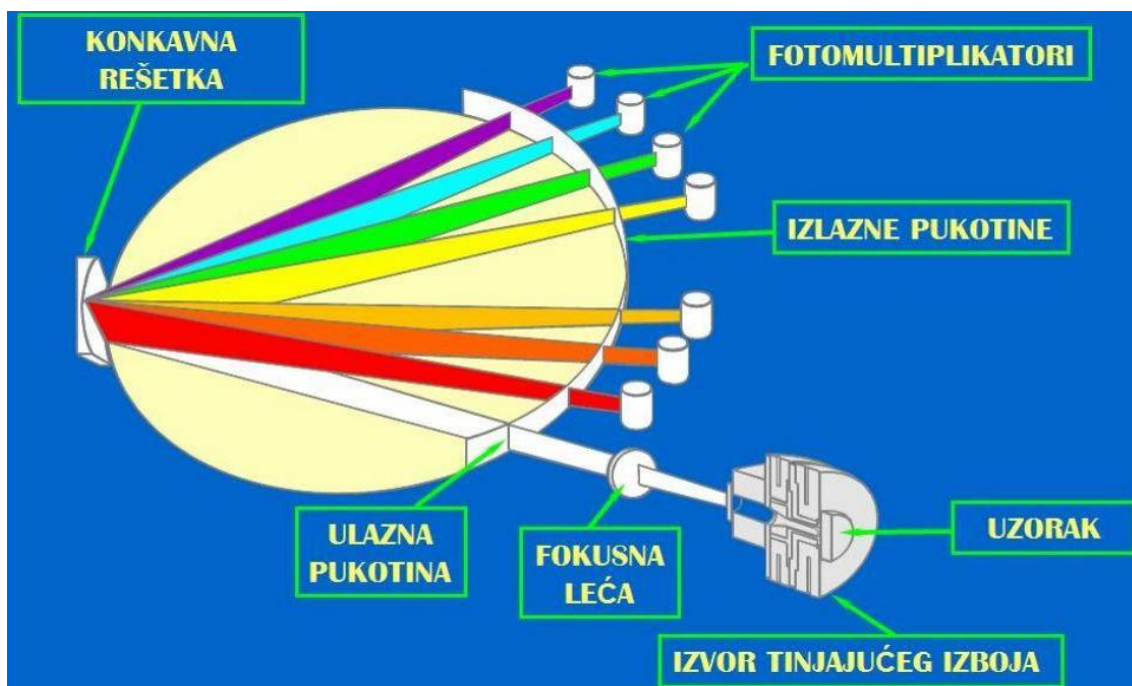
Slika 22. Uređaj za optičku emisijsku spektrometriju s tinjajućim izbojem

Kako bi se napravila analiza potrebno je pobuditi atome što se postiže tinjajućim izbojem, odnosno plazmom. Plazmu čini ionizirani plemeniti plin argon. Ionizirani plin skida sloj s površine ispitnog uzorka koji zatim disocira na atome te dalje slijedi pobuda tih atoma u plazmi. Elektroni u pojedinom atomu iz osnovnog stanja prelaze u pobuđeno stanje tj. na viši energijski nivo, a nakon otprilike 10 ns, elektron se vraća u početno stanje tj. prelazi natrag na niži energijski nivo pri čemu se oslobađa energija koja se emitira u obliku svjetlosnog fotona, kako je prikazano na slici 23.



Slika 23. Mehanizam pobude atoma uzorka kod GD-OES analize [32]

Spomenuta energija, kao i valna duljina emitiranog svjetla, specifična je za svaki atom, odnosno kemijski element. Na taj način omogućena je identifikacija atoma. Intenzitet svjetla ukazuje na udio pojedinog kemijskog elementa u uzorku. Svjetlost nastala u navedenom procesu prolazi kroz spektrometar i koristi se za analizu. Svjetlost najprije prolazi kroz primarnu pukotinu, zatim dolazi na rešetku i reflektira se pod određenim kutom koji ovisi o valnoj duljini te zatim prolazi kroz sekundarnu pukotinu na fotomultiplikator, kao prema slici 24. Struja proizvedena u fotomultiplikatoru proporcionalna je količini emitiranog svjetla, koja je pak povezana s udjelom pojedinih elemenata [32].



Slika 24. Shematski prikaz spektrometra u GD-OES uređaju [32]

U spektrometru može biti postavljeno mnogo fotomultiplikatora sa sekundarnom pukotinom kako bi se istovremeno moglo analizirati veći broj elemenata u uzorku. Uzorak mora biti vodljiv, kako bi se mogao koristiti kao katoda. Kako bi se mogli analizirati nepoznati uzorci, potrebna je analitička metoda koja daje korelaciju između udjela pojedinog elementa i mjerenog intenziteta. Iz tog razloga, potrebno je prije analize uređaj kalibrirati sa standardnim uzorcima čiji je kemijski sastav poznat i točno određen (u tu svrhu se koriste certificirani referentni materijali ili referentni materijali) [32].

4.2. Rezultati provedenih ispitivanja i analiza

4.2.1. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava

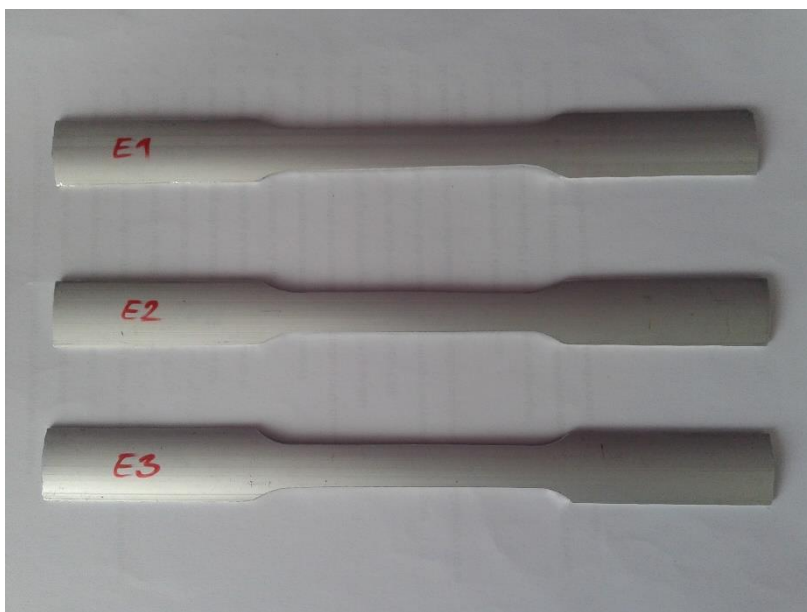
4.2.1.1. Ispitivanje uzoraka aluminijske legure

U vezi materijala jarbola koji se konvencionalno koristi, jedino je poznato da se radi o aluminijskoj leguri. Dio jarbola iz kojeg su se izrađivale ispitne epruvete je prikazan na slici 25.

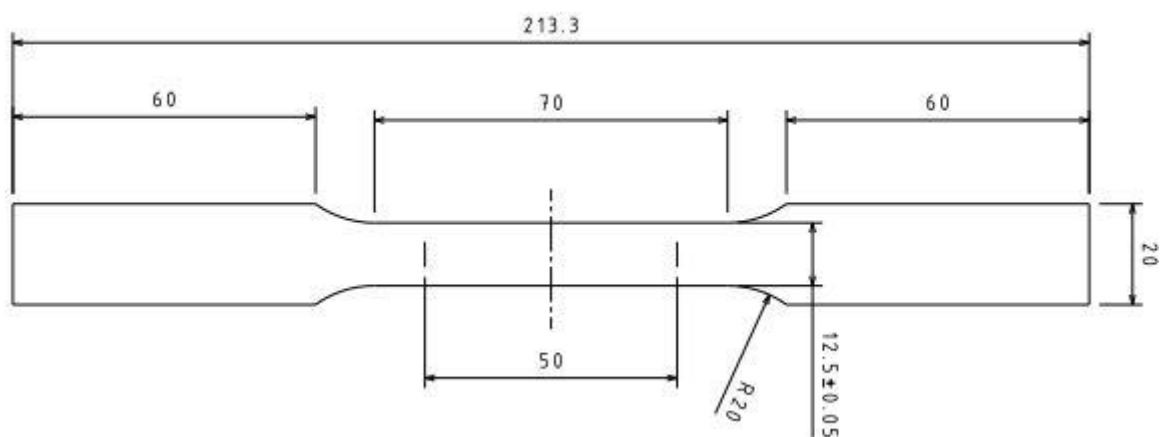


Slika 25. Prikaz dijela jarbola iz kojeg su izrezivane epruvete

Prije samog ispitivanja bilo je potrebno pripremiti epruvete kao što je prikazano na slici 26. Izrezivanje se vršilo u radionici Laboratorija za polimere i kompozite prema skici dobivenoj u Laboratoriju za mehanička ispitivanja, koja je prikazana na slici 27.



Slika 26. Prikaz epruveta spremnih za mehanička ispitivanja



Slika 27. Skica prema kojoj su se izrezivale epruvete

Nadalje, na slici 28. prikazana je cijev jarbola koja je označena i spremna za izrezivanje.



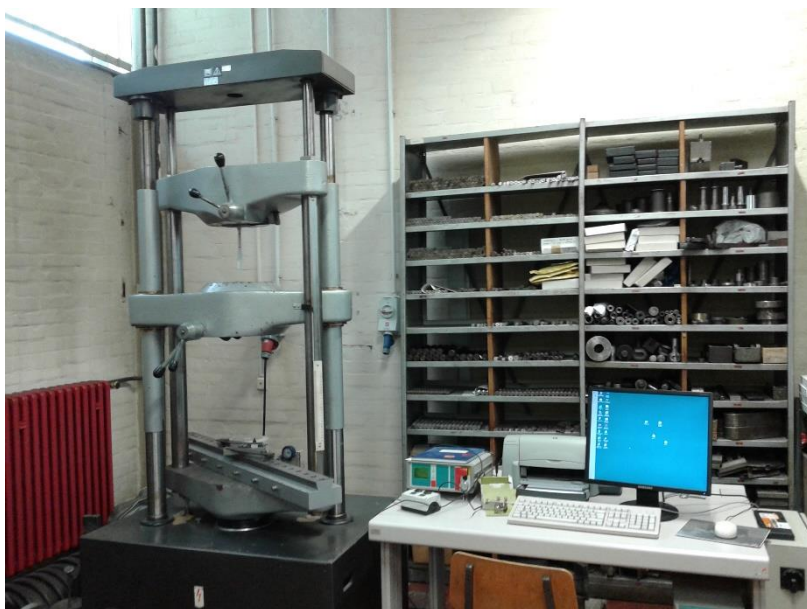
Slika 28. Cijev jarbola s označenim epruvetama za izrezivanje

Potom su epruvete bile izrezane ručnom pilom, a običnom turpijom je bilo potrebno ukloniti višak materijala kako bi se formirala ispitna dužina, što je prikazano na slici 29. Rubovi i prijelazi moraju biti glatki kako ne bi došlo do koncentriranja naprezanja u lokalitetima izvan ispitne duljine epruvete.



Slika 29. Prikaz turpijanja viška materijala i formiranja ispitne duljine

Nakon pripreme, pristupa se ispitivanju na univerzalnoj kidalici WPM EU 40 mod, Njemačke proizvodnje, koja je prikazana na slici 30, a epruveta u zahvatu je prikazana na slici 31. Ispitivanje se provodi na način da se ispitna epruveta stavi u čeljusti kidalice, potom se kidalicom ostvari neko početno naprezanje. Potrebno je postaviti ekstenziometar, koji mjeri točno produljenje ispitne duljine. On se uklanja prije loma epruvete, a prikazan je na slici 32.



Slika 30. Prikaz univerzalne kidalice WPM EU 40 mod u Laboratoriju za mehanička ispitivanja



Slika 31. Epruveta s označenom ispitnom duljinom u zahvatu univerzalne kidalice



Slika 32. Ekstenziometar

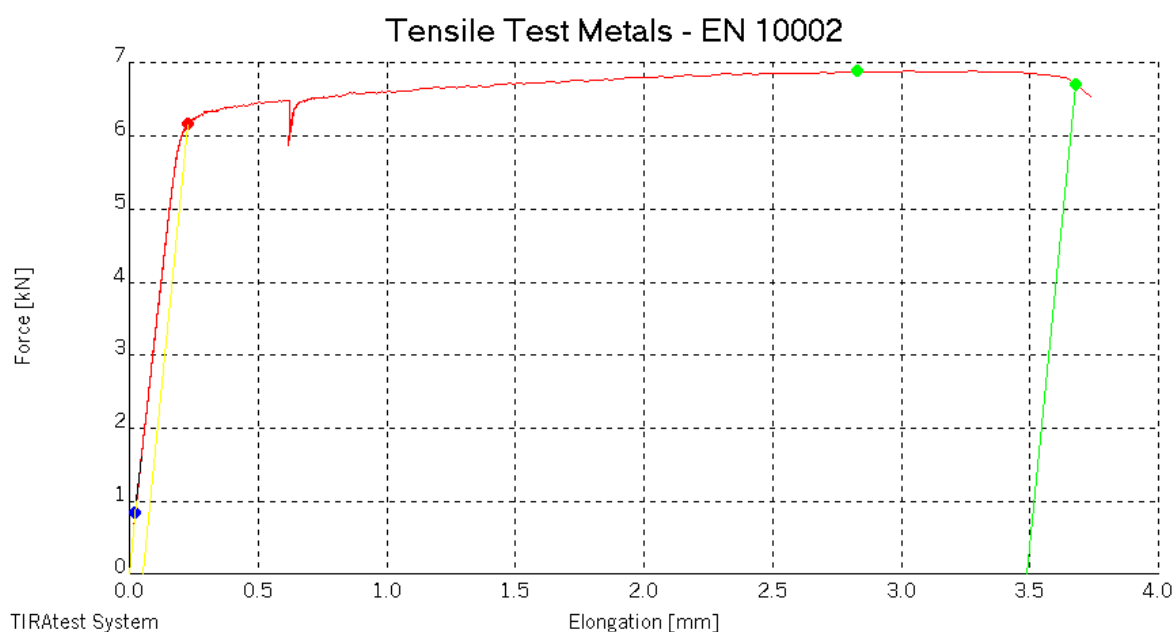
Provedbom ispitivanja mehaničkih svojstava na univerzalnoj kidalici dobiveni su rezultati dani u tablici 2.

Tablica 2. Prikaz rezultata mehaničkih ispitivanja za 3 epruvete

| L₀= 50 mm | L_u [mm] | E [kN/mm²] | R_{p0,2} [N/mm²] | R_m [N/mm²] | F_m [kN] | F_b [kN] | A [%] | S₀ [mm²] |
|---------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|--|---|-------------------------------|-------------------------------|------------------|---|
| E1 | 54,30 | 75,667 | 267,55 | 299,06 | 6,89 | 6,70 | 8,6 | 23,03 |
| E2* | - | 79,851 | 265,79 | 296,21 | 6,50 | 6,24 | - | 21,96 |
| E3 | 54,25 | 75,942 | 266,42 | 295,36 | 6,52 | 6,36 | 8,5 | 22,07 |

* - označava epruvetu kojoj je lom nastupio izvan ispitnog područja L₀

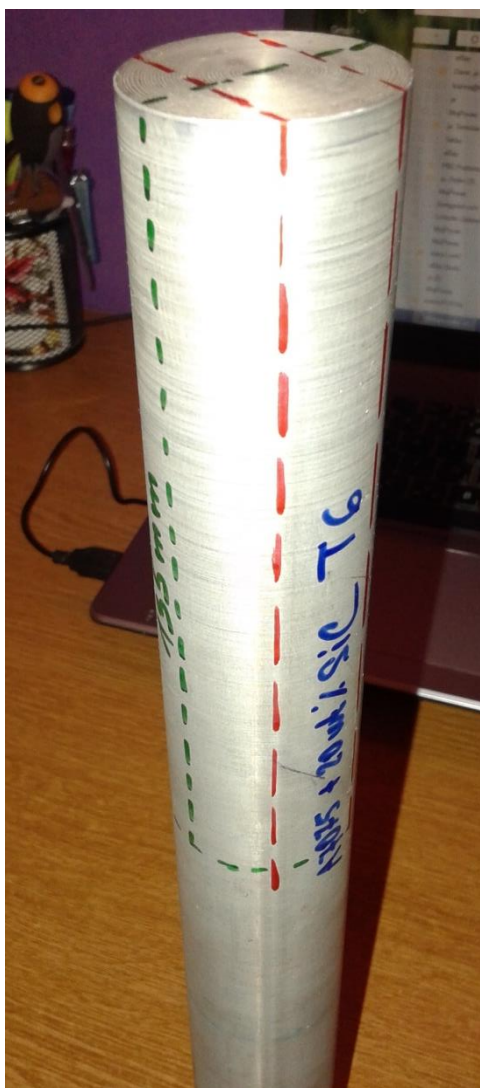
Na slici 33. je prikazan dijagram ispitivanja jedne epruvete na kidalici, koji jasno pokazuje trenutak skidanja ekstenziometra u obliku „jame“ na grafu.



Slika 33. Dijagram Sila - Produljenje za ispitne epruvete.

4.2.1.2. Ispitivanja aluminijske legure s dodatkom SiC čestica

Za kompozitni materijal s metalnom matricom Al 7075 s 20% masenog udjela SiC čestica, dobiven od Slovačkog Instituta za istraživanje materijala nije bilo moguće sprovesti mehanička ispitivanja. Makar se materijal mogao izrezivati metodom rezanja vodenim mlazom. Dobiveni uzorak je prikazan na slici 34. gdje se vide oznake za rezanje vodenim mlazom, tada je uočeno da će bilo kakva naknadna obrada kao i mehanička ispitivanja biti gotovo neizvediva. Ispitivanja su stoga provedena kod proizvođača, te ona su prikazana u tablici 3.



Slika 34. Prikaz uzorka Al 7075 + 20 % SiC prije rezanja vodenim mlazom

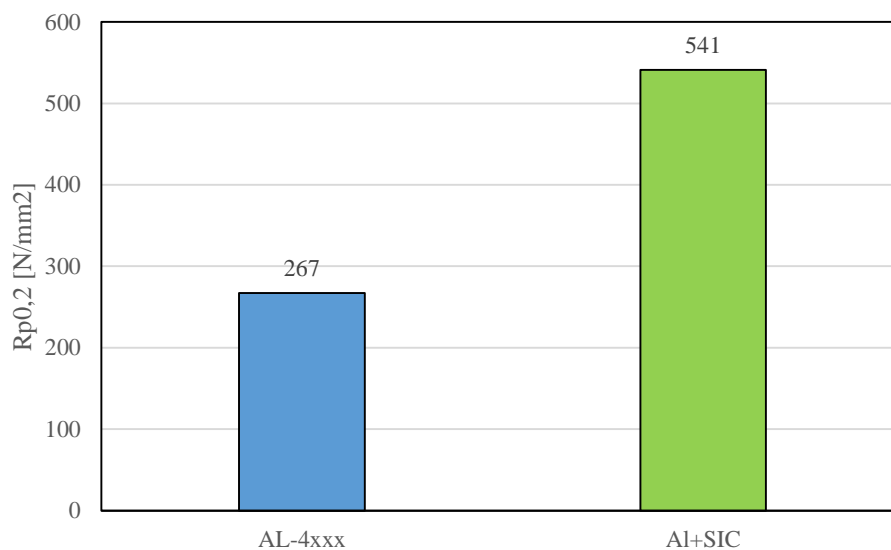
Tablica 3. prikazuje dobivena mehanička svojstva za uzorak Al 7075 s 20 % masenog udjela SiC čestica.

Tablica 3. Mehanička svojstva za uzorak Al 7075+20%SiC

| Svojstva Al 7075+20%SiC | |
|--|-----|
| R_{p0,2} [N/mm²] | 541 |
| R_m [N/mm²] | 587 |
| A [%] | 3 |
| E [GPa] | 94 |

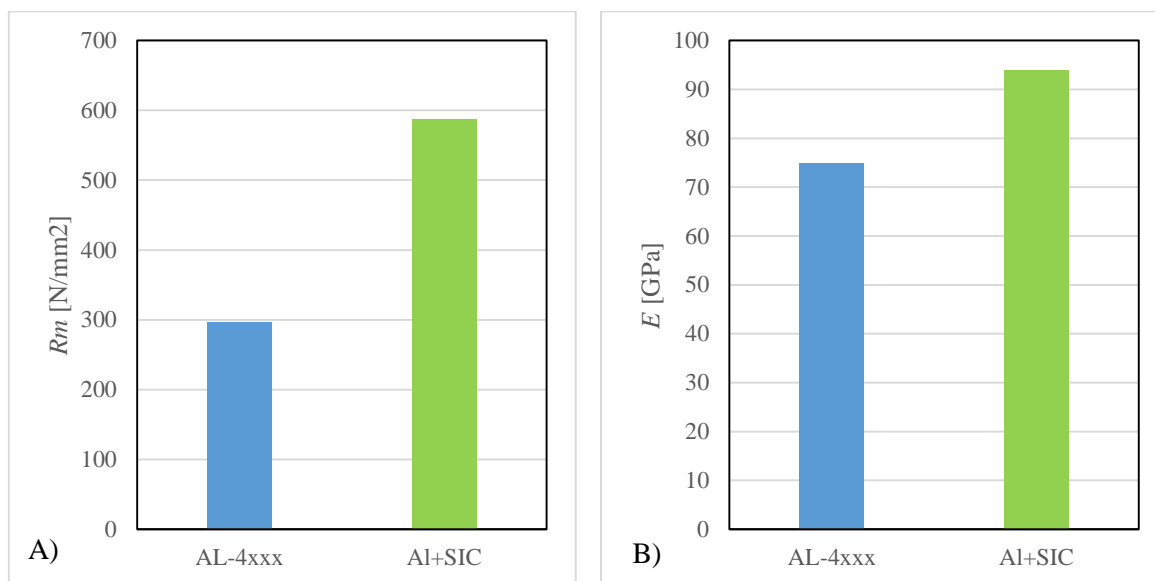
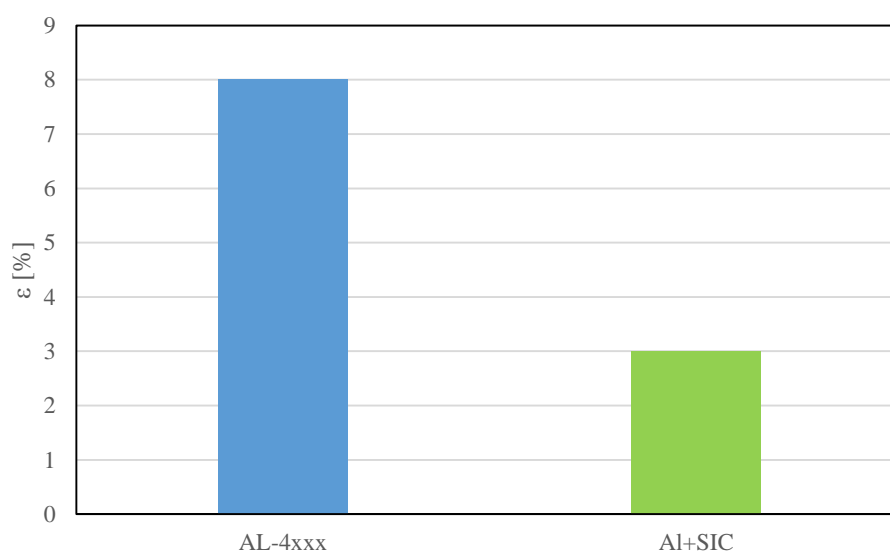
4.2.1.3. Usporedba rezultata mehaničkih ispitivanja

Usporedbom rezultata dijagramom na slici 35. je jasno vidljivo da kompozitni materijal s česticama je znatno boljih mehaničkih svojstava u pogledu granice razvlačenja.



Slika 35. Dijagram usporedbe iznosa granice razvlačenja među uzorcima

Nadalje, dijagrami na slici 36. prikazuju da je kompozitni materijal višeg iznosa vlačne čvrstoće i modula elastičnosti, dok prema dijagramu na slici 37. se vidi da je jedino po pitanju istežljivosti bolja konvencionalna aluminijska legura.

Slika 36. Dijagrami (A) vlačne čvrstoće R_m i (B) modula elastičnosti E među uzorcima

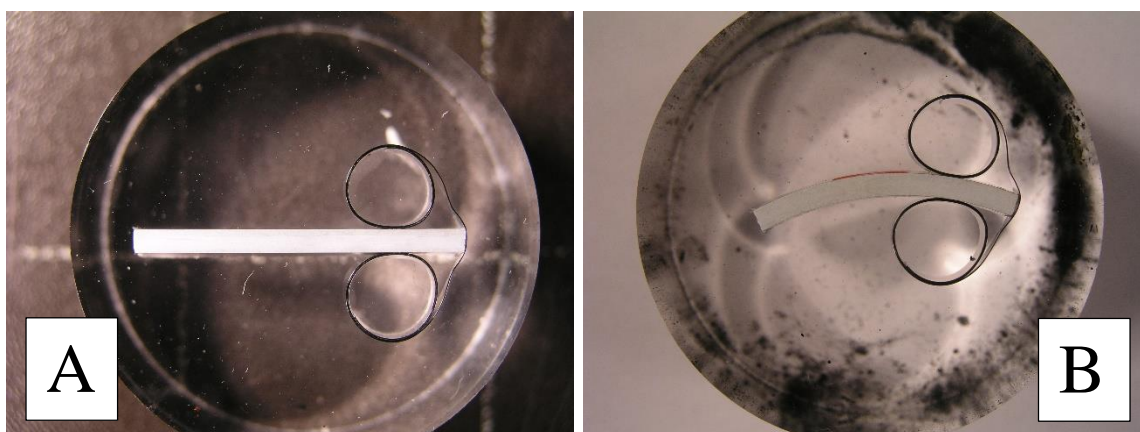
Slika 37. Dijagram istezljivosti među uzorcima

4.2.2. Rezultati metalografske analize

Metalografska analiza je provedena na svjetlosnom mikroskopu Olympus BX51, u Laboratoriju za metalografiju. Nakon provedenog postupka zalijevanja uzoraka u masu za lakše rukovanje, potom brušenja, poliranja i naposljetku dvostrukog nagrivanja provela se analiza.

4.2.2.1. Analiza uzorka aluminijske legure

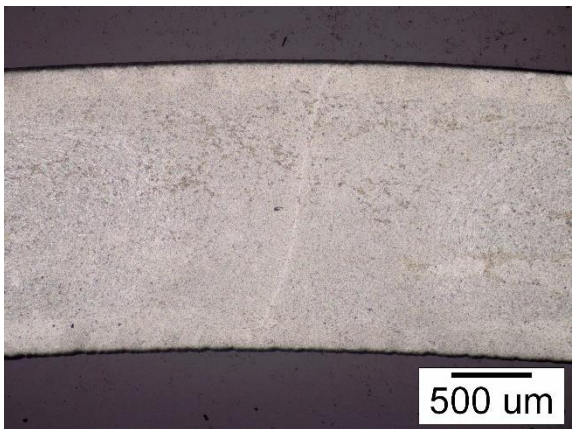
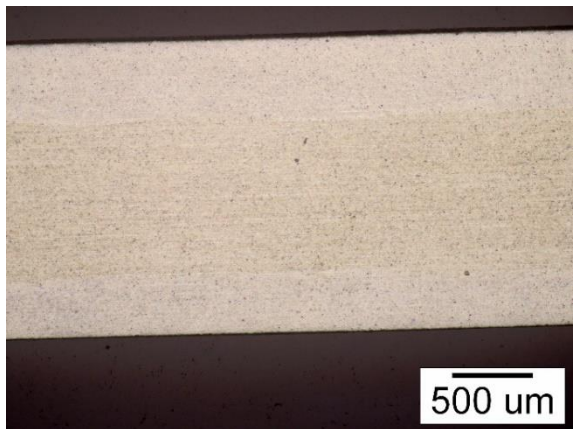
Izrezani su uzorci na način da se može mikroskopski pregledati postoje li razlike u uzdužnom i poprečnom smjeru s obzirom na smjer ekstrudiranja cijevi, kako je prikazano na slici 38. te u svrhu određivanja vrste materijala.

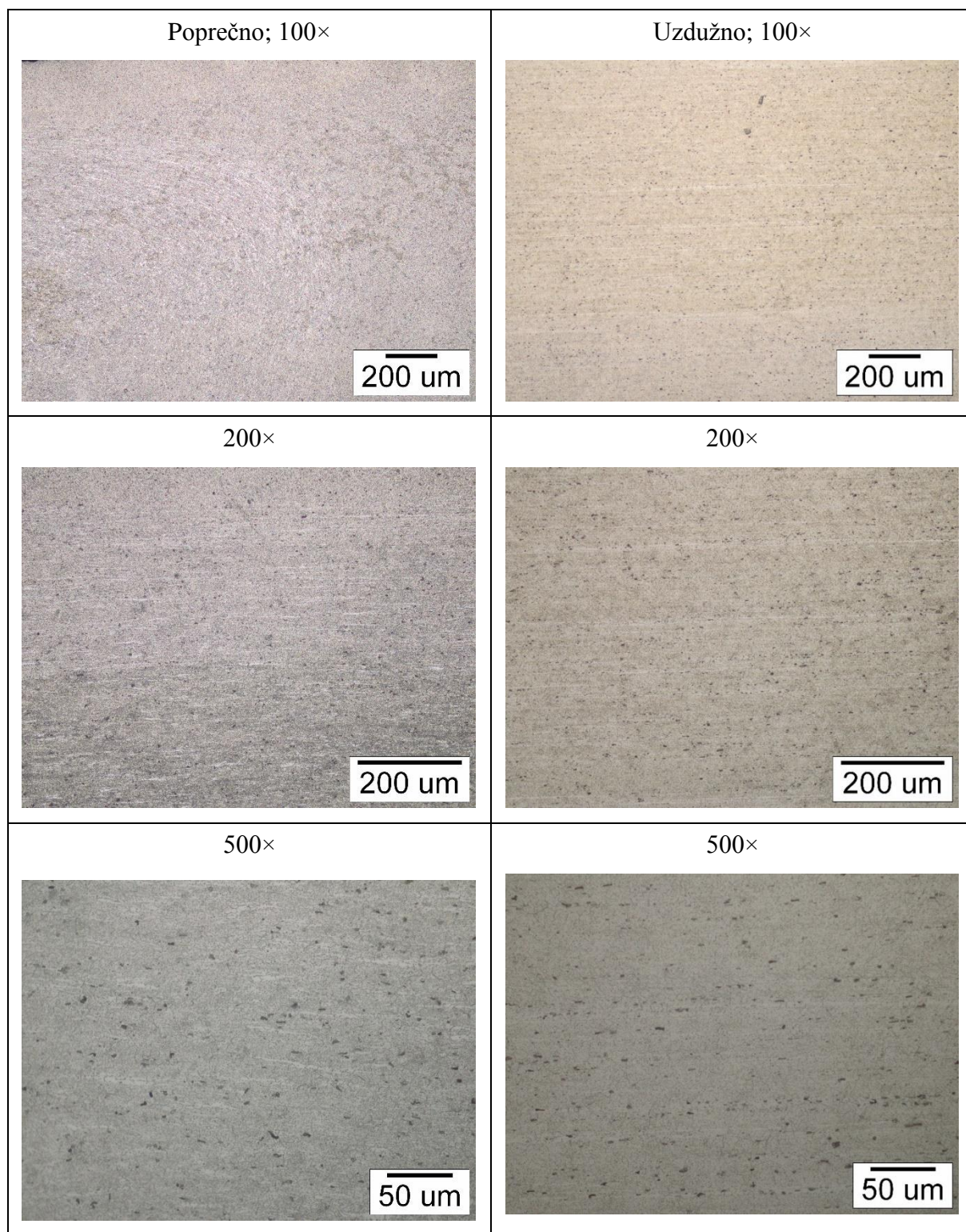


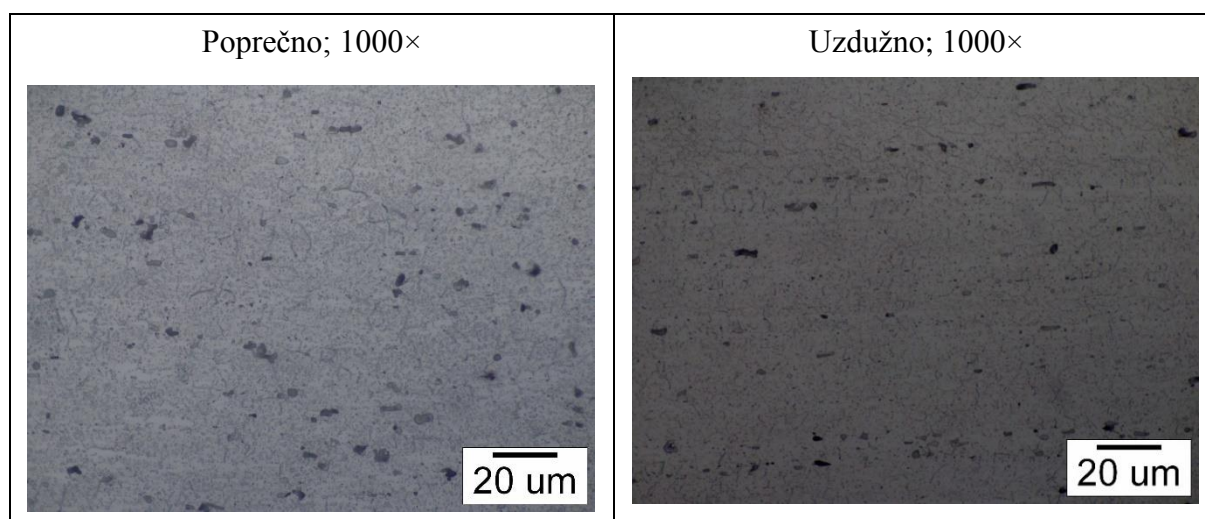
Slika 38. Prikaz zalivenih uzoraka Al-legure spremnih za metalografsku analizu; A) uzdužno; B) poprečno

Rezultati analize na svjetlosnom mikroskopu za poprečni i uzdužni presjek uzoraka aluminijske legure bez dodatka čestica nakon nagrizanja su dani slikama u tablici 4.

Tablica 4. Slike mikrostrukture uzorka Al-legure bez dodatka čestica za poprečni i uzdužni presjek u nagriženom stanju

| Poprečno, nagriženo | Uzdužno, nagriženo |
|---|--|
| 50× | 50× |
|  |  |





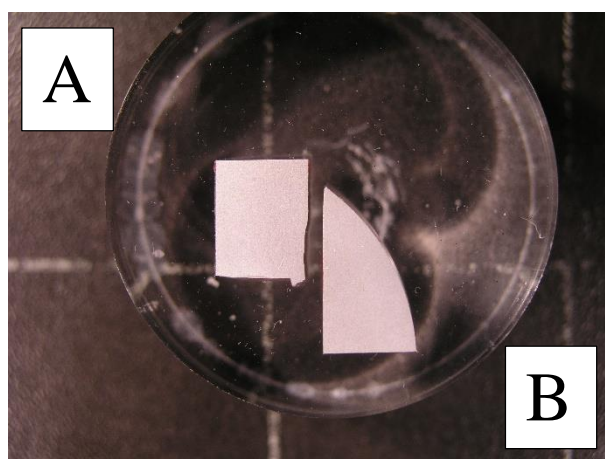
Temeljem uočene mikrostrukture, te uz uporabu Metals Handbook priručnika, zaključuje se da se radi o aluminijskoj leguri serije 4, s toplinskom obradom.

Također, vidljiva je i usmjerenost strukture s obzirom na smjer ekstruzije cijevi.

4.2.2.2. Analiza uzorka Al-SiC kompozita

Nakon izrezivanja uzoraka Al-SiC kompozita, uslijedilo je zalijevanje u masu za lakše rukovanje, te potom su se uzorci brusili, polirali i nagrizali dva puta kako bi se mogla otkriti mikrostruktura i izvršiti analiza.

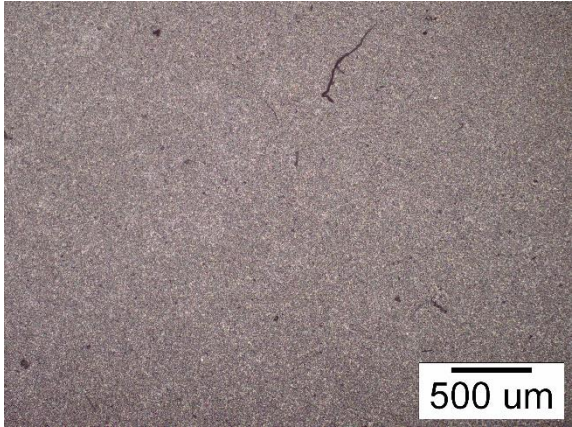
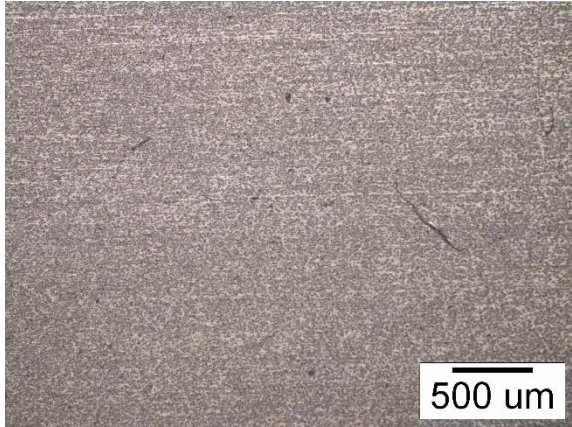
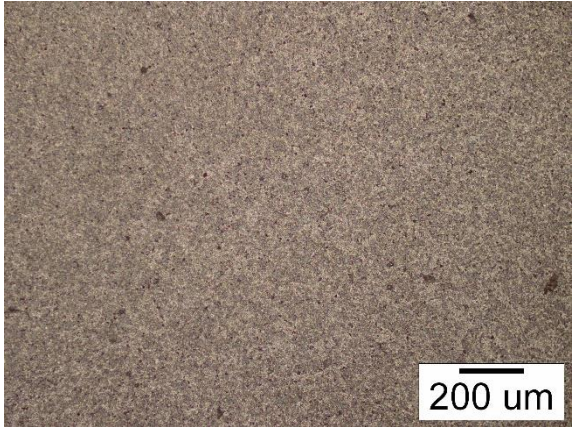
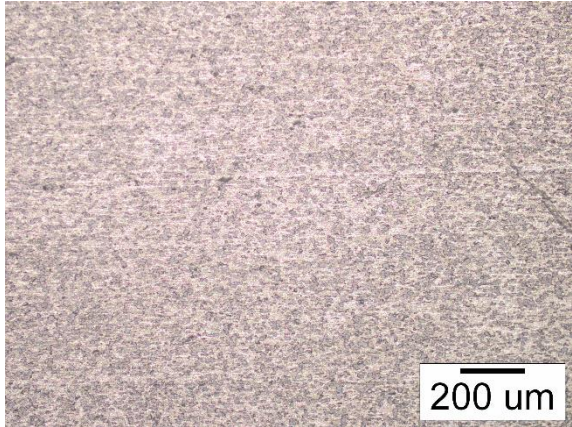
Ovoga puta se u istu masu zalio uzorak kompozita aluminijske legure ojačane s 20 % SiC čestica za poprečno, kao i za uzdužno ispitivanje, kako je prikazano na slici 39.

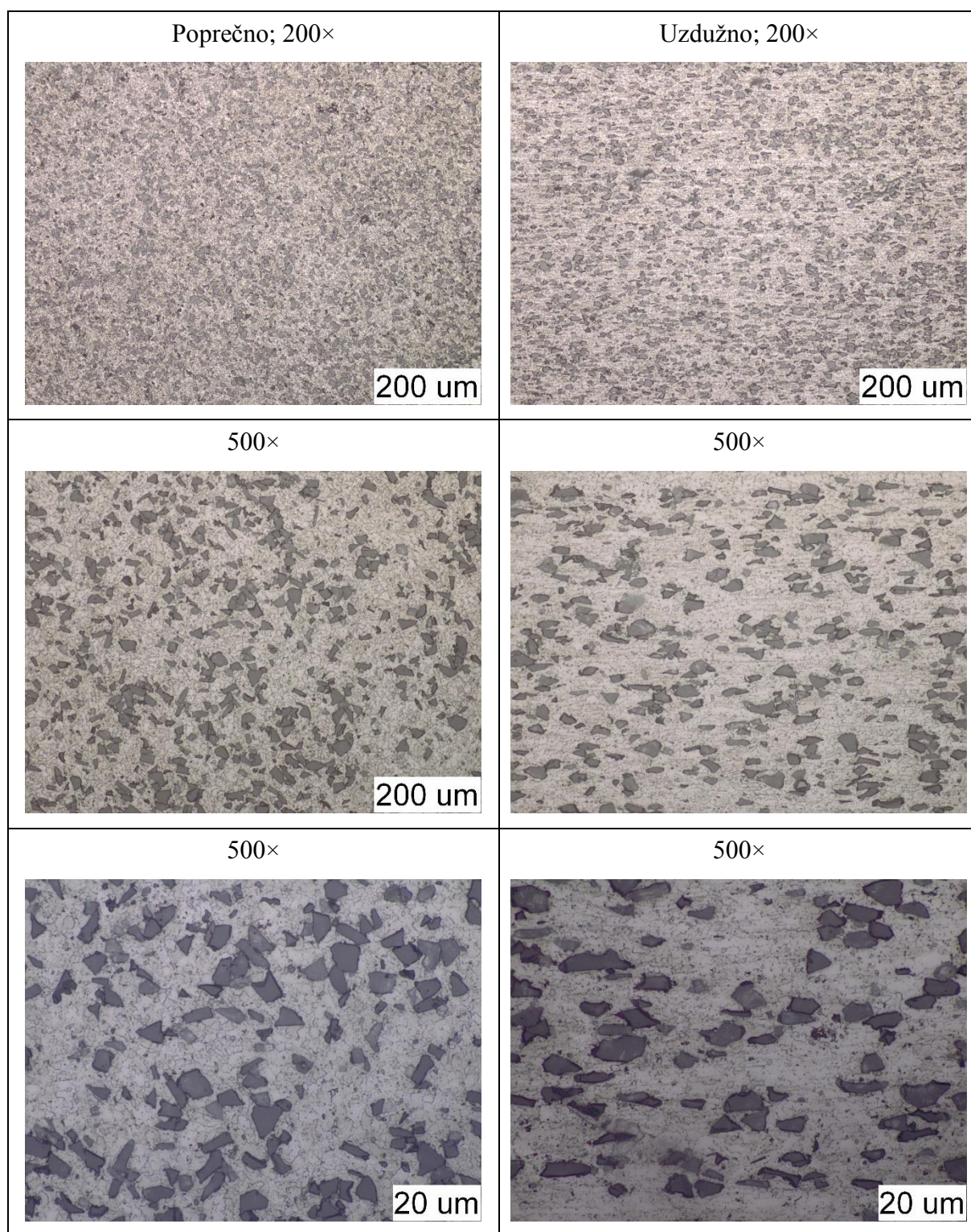


Slika 39. Prikaz uzoraka Al-SiC kompozita spremnih za metalografsku analizu; A) uzdužno, B) poprijeko

Pristupilo se analizi mikrostrukture na svjetlosnom mikroskopu, te su dobivene slike za uzorak Al-SiC kompozita. Slike uzorka poprečnog i uzdužnog presjeka u nagriženom stanju su dane u tablici 5.

Tablica 5. Prikazi uzorka Al-SiC kompozita za poprečni i uzdužni presjek, u nagriženom stanju

| Poprečno | Uzdužno |
|---|--|
| <p>50×</p>  | <p>50×</p>  |
| <p>100×</p>  | <p>100×</p>  |



Temeljem analize svjetlosnim mikroskopom, može se uočiti određena usmjerenost strukture s obzirom na smjer ekstrudiranja šipke Al-SiC kompozita.

4.2.3. Rezultati ispitivanja tvrdoće

U tablici 6. prikazani su rezultati mjerenja tvrdoće po Vickersu na uzorcima aluminijske legure za uzdužni i poprečni smjer ekstrudiranja.

Tablica 6. Prikaz rezultata mjerenja tvrdoće po Vickersu za Al-leguru bez dodatka čestica, za uzdužni i poprečni smjer

| HV 0,5 | Uzdužno | Poprečno |
|-----------|---------|----------|
| | 96 | 104 |
| | 98 | 100 |
| | 98 | 120* |
| | 97 | 103 |
| | 97 | 99 |
| \bar{x} | 97,2 | 101,5 |

*-označava vrijednost koja previše odskake te je izuzeta iz proračuna aritmetičke sredine

Potom se mjerila tvrdoća po Vickers-u na uzorcima aluminijske legure s 20% masenog udjela SiC čestica, te su rezultati prikazani u tablici 7.

Tablica 7. Prikaz rezultata mjerenja tvrdoće po Vickersu Al-SiC kompozita za uzdužni i poprečni smjer

| HV1 | Uzdužno | Poprečno |
|-----------|---------|----------|
| | 213 | 221 |
| | 217 | 206 |
| | 216 | 209 |
| \bar{x} | 215 | 212 |

Nakon toga se pristupilo mjerenju tvrdoće po Brinell-u, koja je prvotno davala nezadovoljavajuće rezultate, ali nakon poliranja mjerne površine, rezultati su nešto manje odstupali.

Tvrdoća po Brinell-u za uzorak Al-SiC kompozita iznosi:

$$HBW_{5/250}=191$$

4.2.4. Rezultati kvantitativne analize - Optičkom emisijskom spektrometrijom s tinjajućim izbojem (GD-OES)

U tablici 8. prikazani su rezultati kvantitativne analize provedene na optičkom emisijskom spektrometru GDS 850 Leco za uzorak aluminijske legure kao i za uzorak Al-SiC kompozita.

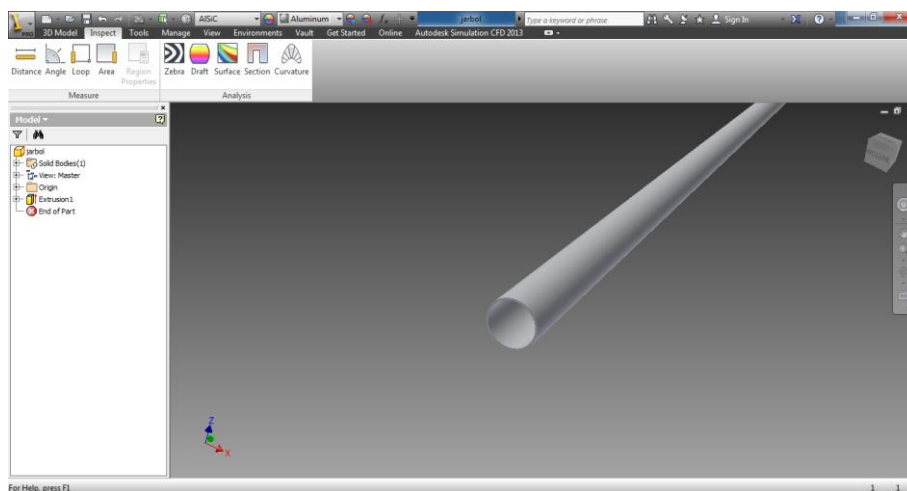
Tablica 8. Rezultati kvantitativne analize za uzorak Al-SiC kompozita i uzorak Al-legure

| oznaka uzorka | % | | | | | | | | | |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|---------|
| | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti | Ni | Al |
| Al-SiC | 13 | 0,08 | 1,04 | 0,03 | 2,00 | 0,15 | 5,70 | 0,011 | 0 | Ostatak |
| Al- 4xxx | 0,70 | 0,20 | 0,07 | 0,40 | 0,64 | 0,02 | 0,01 | 0,03 | <0,01 | Ostatak |

Iz rezultata se može uočiti značajna razlika u udjelima elemenata, posebice Si, Fe i Cu između uzoraka.

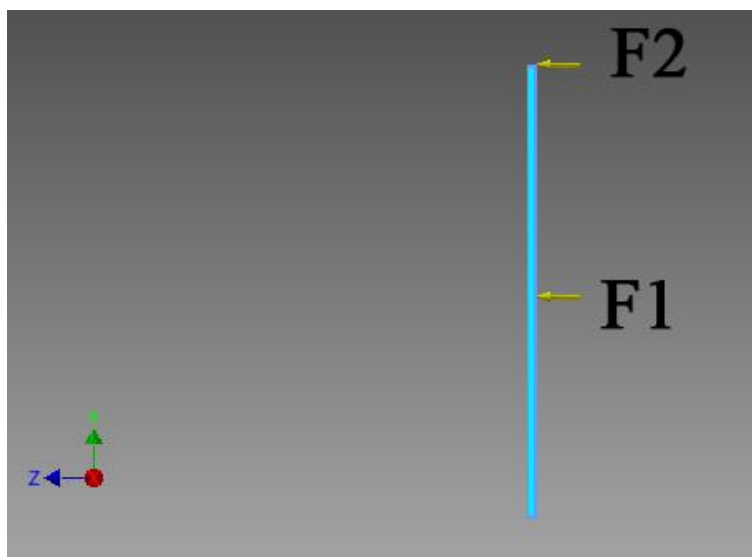
4.3. Simulacija savijanja jarbola i usporedba ponašanja ispitanih materijala FEM analizom

Proračun ponašanja jarbola je izveden uporabom programskog paketa Autodesk Inventor 2013, studentska inačica. Potrebno je usporediti ponašanje dvaju analiziranih materijala, te uočiti koliko je ponašanje predloženog kompozita s metalnom matricom, ojačanog s česticama SiC bolje pri savojnom naprezanju tijekom uporabe. Sučelje za rad u Autodesk Inventor 2013 je prikazano na slici 40.



Slika 40. Prikaz sučelja programskog paketa Autodesk Inventor 2013

Prvo se pristupilo modeliranju jarbola od aluminijske legure bez dodatka čestica. Prilikom modeliranja opterećenja koje djeluje na jarbol, pretpostavljene su dvije sile koje su proizvoljno postavljenog iznosa, pa tako jedna sila, na gornjem kraju jarbola iznosi 200 N, dok druga iznosi 100 N, uklještenje se postavilo na donji kraj modela jarbola. Sile su morale biti proizvoljno postavljene jer da bi se znali njihovi stvarni iznosi u eksploataciji bilo bi potrebno provesti istraživanja koja nadilaze okvire rada i trenutne mogućnosti. Slika 41. prikazuje model jarbola sa spomenutim silama koje djeluju na njega.

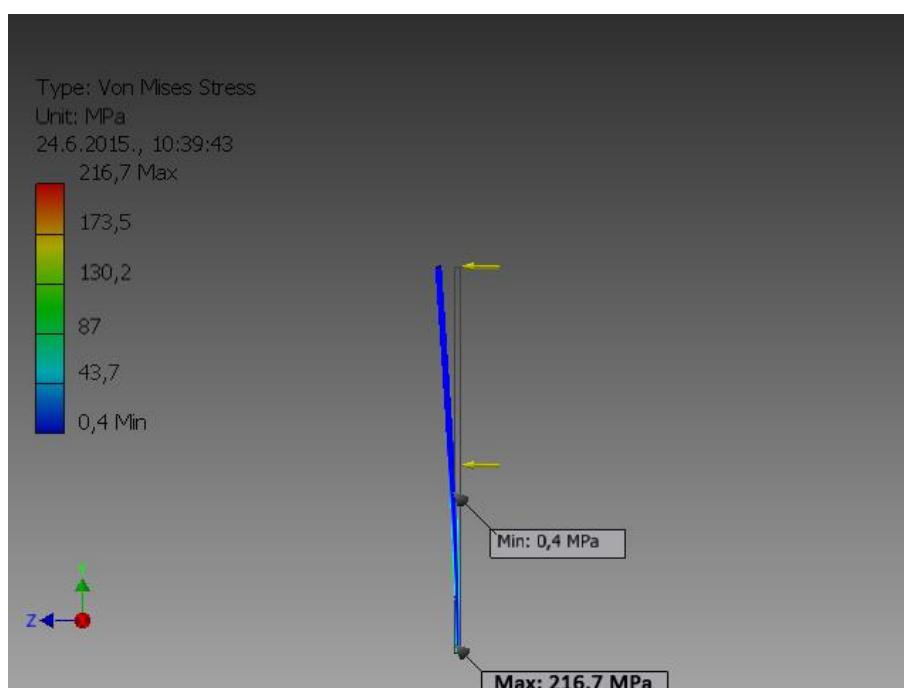
Slika 41. Modelirani jarbol sa silama $F_1=100\text{N}$, $F_2=200\text{N}$

Potom se provela analiza metodom konačnih elemenata, koja je po završetku dala rezultate koji su dani u tablici 9.

Tablica 9. Rezultati statičke analize metodom konačnih elemenata za uzorak Al-legure

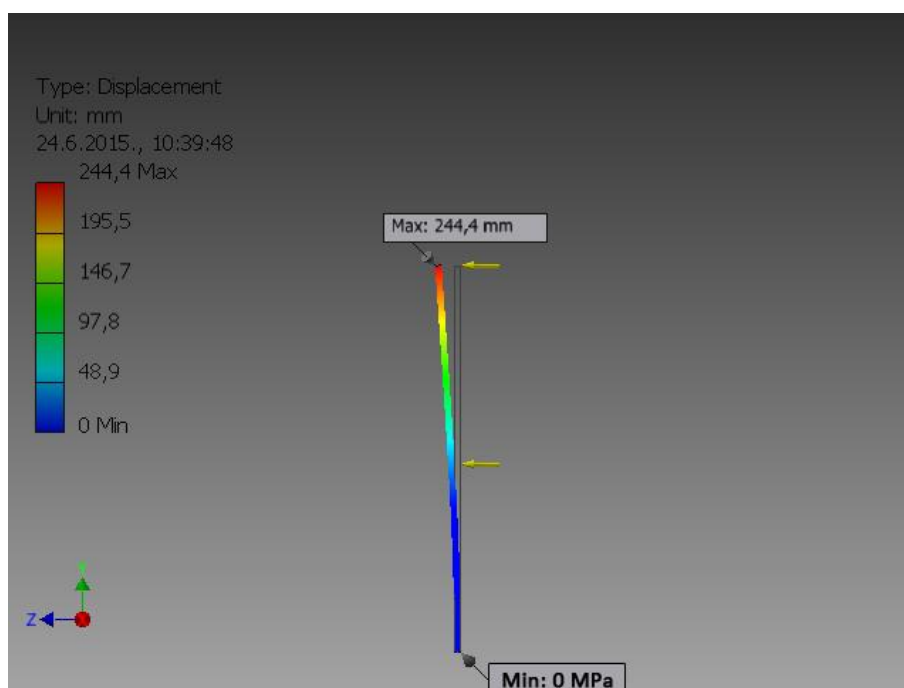
| | |
|---------------------------|--------|
| Iznos progiba | 244 mm |
| Iznos sigurnosnog faktora | 1,23 |

Djelovanja i mjesta najvećeg naprezanja su prikazani na slici 42, za vizualizaciju. Treba uzeti u obzir da se zbog ponašanja modeliranog modela, ne vidi dio koji je unutar uklještenja, odnosno dio jarbola koji bi bio u osloncu u trupu sportske jedrilice.



Slika 42. Vizualizacija naprezanja na modeliranom jarbolu od Al-legure bez dodatka čestica

Također, na slici 43. je prikazano ponašanje progiba uklještenog jarbola od aluminijske legure bez dodatka čestica, s naznačenim mjestima najvećeg i najmanjeg progiba.



Slika 43. Progibi jarbola od Al-legure bez dodatka čestica

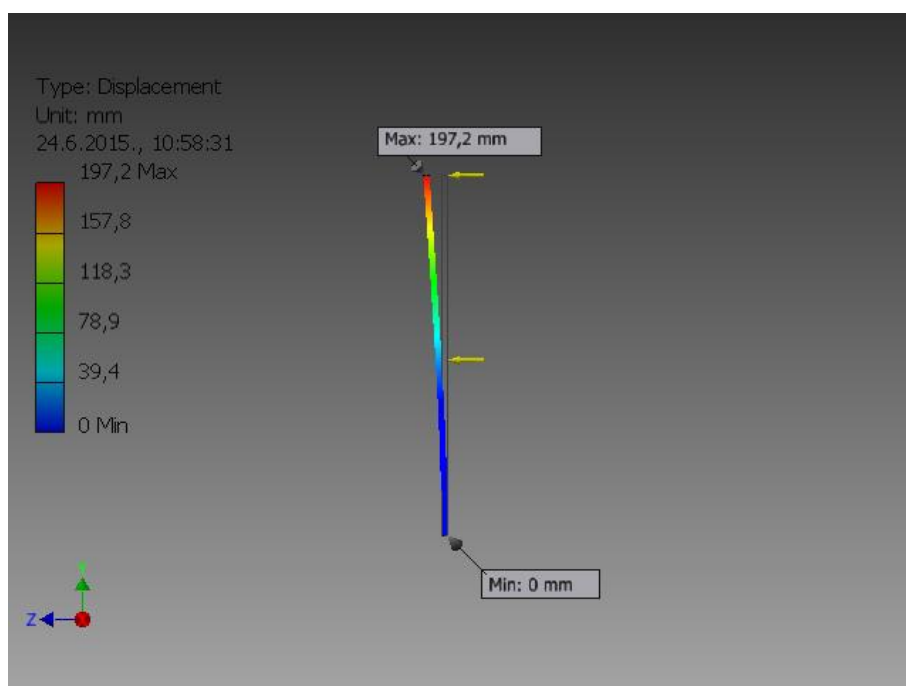
U svrhu provedbe usporedbe analiziranih materijala provela se analiza ponašanja metodom konačnih elemenata za kompozit s matricom od aluminijske legure s dodatkom SiC čestica. Postavljena situacija sa silama i uklještanjem se nije mijenjala, samo su se promijenili iznosi mehaničkih svojstava.

Rezultati provedene analize kompozita s metalnom matricom s dodatkom SiC čestica su dani u tablici 10.

Tablica 10. Rezultati statičke analize metodom konačnih elemenata za uzorak s dodatkom SiC čestica

| | |
|---------------------------|--------|
| Iznos progiba | 197 mm |
| Iznos sigurnosnog faktora | 2,38 |

Na slici 44. prikazano je ponašanje progiba uklještenog jarbola od aluminijske legure s dodatkom SiC čestica, s naznačenim mjestima najvećeg i najmanjeg progiba.



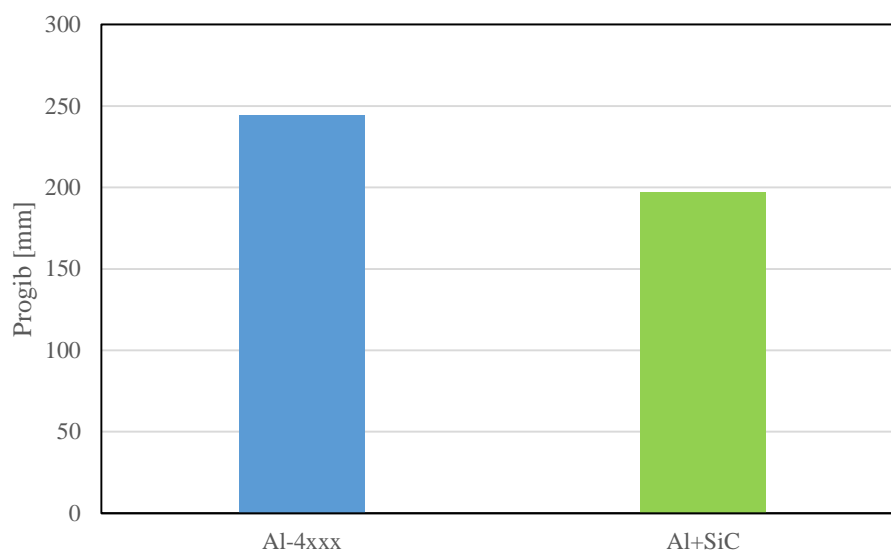
Slika 44. Progibi jarbola od Al-SiC kompozita

Također, vrijednosti dobivene simulacijom ponašanja za jarbol načinjen od aluminijske legure i onoga načinjenog od Al-SiC kompozita se mogu usporediti u tablici 11.

Tablica 11. Vrijednosti najvećeg progiba za Al- leguru i Al-SiC kompozit

| Al-legura | Al-SiC kompozit |
|-----------|-----------------|
| 244 mm | 197 mm |

U konačnici dobivene vrijednosti se mogu grafički usporediti. Dijagramom na slici 45. može se uočiti kako kompozit s metalnom matricom s dodatkom SiC čestica ima značajno manji iznos progiba pri istim naprezanjima koja na njega djeluju.



Slika 45. Dijagram progiba među analiziranim materijalima

Analizom i rezultatima dobivenim metodom konačnih elemenata, može se uočiti kako jarbol načinjen od kompozita s metalnom matricom i dodatkom SiC čestica pokazuje značajno bolja svojstva u pogledu manjih progiba pri jednakim naprežanjima.

5. ZAKLJUČAK

Provedenim ispitivanjima i analizama, te prema dobivenim rezultatima mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- Ispitivanjem mehaničkih svojstava pokazalo se da dodatkom 20 % masenog udjela SiC čestica u aluminijsku leguru se mogu povisiti iznosi konvencionalne granice razvlačenja, vlačne čvrstoće i modula elastičnosti, dok istezljivost opada.
- Metalografskom analizom, te kvantitativnom analizom pokazano je da se za jarbol sportske jedrilice klase Laser uobičajeno koristi aluminijska legura Al-Si (serije 4000). Također je vidljivo da je struktura usmjerena s obzirom na smjer ekstrudiranja cijevi.
- Mjerenjem tvrdoće pokazano je kako Al-SiC kompozit ima značajno veću tvrdoću, što se može dovesti u vezu sa smanjenom istezljivošću koja je uočena prilikom ispitivanja mehaničkih svojstava.
- Modeliranjem i simulacijom ponašanja jarbola pokazalo se kako bi jarbol načinjen od kompozita s aluminijskom matricom i dodatkom 20% SiC čestica bio prikladniji za tu primjenu obzirom da pri jednakim naprezanjima pokazuje manje progibe. Masa jarbola izrađenog od Al-SiC kompozita bi bila nešto veća, ali zbog povoljnijih svojstava može se razmatrati i smanjenje debljine stjenke. Međutim treba uzeti u obzir i visoku cijenu matrice, a i eventualne naknadne obrade odvajanjem čestica, što ovaj materijal trenutačno čini neisplativim s ekonomskog gledišta.

6. LITERATURA

- [1] T. W. Clyne i P. J. Withers, *An Introduction to Metal Matrix Composites*, Cambridge: The Press Syndicate of the University of Cambridge, 1995.
- [2] T. Filetin, F. Kovačiček i J. Indof, *Svojstva i primjena materijala*, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2002.
- [3] S. Biswas, *Processing, Characterization And Wear Response Of Particulate Filled Epoxy Based Hybrid Composite*, Rourkela: Department of Mechanical Engineering National Institute of Technology Rourkela, India, 2010.
- [4] G. Ondracek, *Werkstoffkunde: Leitfaden für Studium und Praxis*, Würzburg: Expert-Verlag, 1994.
- [5] S. M. Lee, *Reference Book for Composites Technology*, Lancaster: CRC Press, 1989.
- [6] K. U. Kainer, *Metal matrix Composites: Custom-made Materials for Automotive and Aerospace Engineering*, Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH, 2006.
- [7] M. Xanthos, *Part One, Polymers and Fillers*, Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, 2010.
- [8] R. N. Rother, *Particulate Fillers for Polymers*, iSmithers Rapra Publishing, 2001.
- [9] K. U. Kainer, *Metallische Verbundwerkstoffe*, Oberursel : DGM Informationsgesellschaft, 1994.
- [10] T. Filetin, *Predavanja iz kolegija: Napredne tehnologije materijala*, Zagreb: FSB, 2015.
- [11] *Keramal Aluminum-Verbundwerkstoffe*, Ranshofen, Österreich: Aluminum Ranshofen Ges.m.b.H., 1992.
- [12] H. P. Degischer, »Schmelzmetallurgische Herstellung von Metallmatrix-Verbundwerkstoffen,« *Metallische Verbundwerkstoffe*, svez. 1, br. 1, pp. 139-168, 1994.
- [13] J. Schröder i K. U. Kainer, »Magnesium Base Hybrid Composites Prepared by Liquid Infiltration,« *Mater. Sci. Eng.*, svez. A, br. 135, pp. 33-36, 1991.
- [14] Y. Yang, L. Peng i P. Fu, »Effects of Process Parameters on the Macrostructure of a Squeeze-Cast Mg-2.5 mass%Nd Alloy,« *Materials Transactions*, svez. 50, br. 12, pp. 2820-2825, 2009.

- [15] K. K. Chawla, »Composite Materials - Science and Engineering,« *Springer-Verlag*, p. 102, 1997.
- [16] R. J. Arsenault i N. Shi, *Mater. Sci. Eng.*, svez. 175, p. 81, 1986.
- [17] S. Suresh i K. K. Chawla, *Fundamentals of Metal Matrix Composites*, Stoneham: Butterworth-Heinemann, 1993.
- [18] F. J. Humphreys, »Deformation and annealing mechanisms in discontinuously reinforced metal-matrix composites,« *Proc. 9th Risø Int. Symp. on Mechanical and Physical Behavior of Metallic and Ceramic Composites*, pp. 51-74, 1988.
- [19] M. Singla, D. D. Dwivedi, L. Singh i V. Chawla, »Development of Aluminium Based Silicon Carbide Particulate Metal Matrix Composite,« *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, svez. 8, br. 6, pp. 455-467, 2009.
- [20] A. G. Leatham, A. Ogilvy i L. Elias, »Proc. Int. Conf. P/M in Aerospace, Defence and Demanding Applications,« *MPIF*, pp. 165-175, 1993.
- [21] <http://sailing.about.com/od/learntosail/u/UserPathGetStarted.htm>, [12.03.2015].
- [22] <http://www.timeline-help.com/sailboat-history-timeline.html>, [11.03.2015].
- [23] <http://www.thefreedictionary.com/regatta>, [11.03.2015].
- [24] <http://www.cowesyachtclub.com/history.html>, [11.03.2015].
- [25] http://www.exchange3d.com/images/uploads/aff252/new7//Roman_galley0.jpg, [12.03.2015].
- [26] Jugoslavenski leksikografski zavod: "Pomorska Enciklopedija", Zagreb: Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 1976.
- [27] http://www.exchange3d.com/images/uploads/aff252/new7//Roman_galley0.jpg, [12.03.2015].
- [28] <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA5052O>, [12.03.2015].
- [29] http://www.sailangle.com/uploads/userfiles/2/5065ea540fd74_viewimage.php-8.jpeg, [12.03.2015].
- [30] D. Landek, *Autorizirana predavanja iz područja materijala*, Zagreb: FSB, 2013.
- [31] B. Kraut, *Strojarski priručnik*, Zagreb: Sajema d.o.o., 2009.

[32] L. Ćurković, *predavanja iz kolegija Karakterizacija materijala*, Zagreb: FSB, 2012.